

Niko Lehikoinen

Teräsbetonisen kulmatukimuurin mitoitus euro-koodein

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

30.1.2015



Tekijä(t) Otsikko	Niko Lehikoinen Teräsbetonisen kulmatukimuurin mitoitus eurokoodein
Sivumäärä Aika	56 sivua + 0 liitettä 30.1.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaaja(t)	Toimialajohtajan varamies Kari Saarivirta Lehtori Timo Leppänen
<p>Tämän opinnäytetyön toimeksianto saatiin Insinööritoimisto Pontek Oy:ltä. Opinnäytetyössä perehdyttiin teräsbetonisen kulmatukimuurin mitoittamiseen talonrakennuskohteissa. Opinnäytetyön tavoitteena oli tuottaa laskentapohja kulmatukimuurin mitoitukseen ja tutkia mitoitukseen liittyvää teoriaa.</p> <p>Tukimuuri on rakenne jolla tasataan maanpinnan korkeuseroja, kun maaluiskia ei voida tai haluta käyttää. Niiden avulla voidaan rakentaa rakenteita, joilla maamassat pysyvät suuremmassa kulmassa, kuin mitä ne luonnollisessa tilassa kestäisivät. Kulmatukimuurin toiminta perustuu anturan päällä olevan maamassan stabiloivaan vaikutukseen. Anturan päällä olevalla maa-aineksen ominaisuuksilla on suuri merkitys mitoituksessa.</p> <p>Eurokoodit ovat kokoelma Euroopan Unionin alueella käytössä olevista kantavien rakenteiden suunnittelua koskevista standardeista. Eurokoodien tarkoituksena on yhdistää jäsenmaiden rakenteiden suunnittelun ja rakentamistuotteita määräävät standardit yhdeksi kokonaisuudeksi. Tarkoituksena on ollut kaupan teknisten esteiden poistaminen ja jäsenmaiden teknisten vaatimusten yhdenmukaistaminen.</p>	
Avainsanat	Tukimuuri,mitoitus,eurokoodi

Author(s) Title	Niko Lehtikoinen Design of Retaining Wall Using Eurocodes
Number of Pages Date	56 pages + 0 appendices 30 January 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Instructor(s)	Kari Saarivirta, Department deputy manager Timo Leppänen, Senior Lecturer
<p>The thesis was commissioned by Engineering Office Pontek OY. The thesis studies the design of a retaining wall made of reinforced concrete in house building projects. The main object of this work was to create a program that designs a retaining wall and to study the theory behind design.</p> <p>A retaining wall is a structure that is designed to restrain soil into unnatural slopes. They are used to bound soils between two different elevations when slopes cannot be used. The weight of the restrained material on the base slab helps the structure to maintain its stability. Properties of the backfill has great effect in the design of a retaining wall.</p> <p>Eurocodes are a collection of standards that are used when designing a load-bearing structure. They used in the area of European Union. The main purpose of Eurocodes is to combine all the standards considering structural design and manufacturing construction products into a single system. Eurocodes harmonize technical specifications for building products and remove the barriers for trade.</p>	
Keywords	Retaining wall, design, eurocodes

Sisällys

Käsitteet

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Tavoitteet	1
1.2	Rajaukset	2
1.3	Eurokoodijärjestelmä	2
2	Tukimuuri	4
2.1	Määritelmä	4
2.1.1	Massiivinen tukimuuri	4
2.1.2	Kulmatukimuuri	6
2.1.3	Laippa- ja siipitukimuuri	7
3	Rajatilat	9
3.1	Käyttörajatila	9
3.2	Murtorajatila	9
3.2.1	STR-Rakenteen tai rakenteen osien murtuminen	10
3.2.2	GEO-Rakennuspohjan murtuminen	10
3.2.3	EQU-Tasapainon menettäminen	10
3.2.4	UPL-Vedenpaineen aiheuttama noste	11
4	Kuormat	12
4.1	Kuormat eurokoodeissa	12
4.2	Maanpaine	13
4.2.1	Lepopaine	14
4.2.2	Coulombin maanpaineteoria	16
4.2.3	Tiivistyskuorma	25
4.3	Pysyvät kuormat	26
4.4	Muuttuvat kuormat	26
4.5	Onnettomuuskuormat	26
5	Mitoitus	27
5.1	Mitoitustavat	27
5.2	Kantokestävyys	32

5.2.1	Kantokestävyys suljetuissa olosuhteissa	34
5.2.2	Kantokestävyys avoimissa olosuhteissa	34
5.3	Liukumiskestävyys	37
5.4	Kaatuminen	39
5.5	Kokonaisvakavuus	39
5.6	Painumat	39
5.7	Rakenteellinen mitoitus	40
5.7.1	MRT	40
5.7.2	KRT	41
6	Mitoitus esimerkki laskentapohjan avulla	44
7	Yhteenveto	53
8	Pohdinta	54
	Lähteet	55

Käsitteet

OCR	Ylikonsolidoitumissuhde. Geotekninen parametri, joka kuvaa maaperän jännitystilojen muutosta. Matemaattisesti $S_{v,max} / S_v$
HYD	Eurokoodien mukainen rajatila, missä tarkistetaan rakenteen kestävyys suotovirtauksen aikaansaaman hydraulisen nousun aiheuttamaa murtumista vastaan

Lyhenteet

Latinalaiset isot kirjaimet

A`	perustuksen tehokas pinta-ala
A	onnettomuuskuorma
B	perustuksen leveys
B`	perustuksen tehokas leveys
D	perustamissyvyys
E	kuormien vaikutus rakenteeseen tai rakenneosaan
E _d	E:n mitoitusarvo
E _{stb;d}	kuormien vakauttavan vaikutuksen mitoitusarvo
E _{dst;d}	kuormien kaatavien vaikutusten mitoitusarvo
G	eurokoodien mukainen pysyväkuorma
G _d	G:n mitoitusarvo

H	vaakakuorma tai kuorman vaakakomponentti
H_d	H :n mitoitusarvo
K_o	lepopainekerroin
$K_{o;b}$	lepopainekerroin, kun tuettava maanpinta on kulmassa b
K_a	aktiivisen maanpaineen kerroin
K_p	passiivisen maanpaineen kerroin
L	perustusten pituus
L'	perustusten tehokas pituus
Q	eurokoodien mukainen muuttuva kuorma
$Q_{dst;d}$	epäedullisten muuttuvien kuormien suunnitteluarvo
R_d	rakenteen tai rakenteen osan kestävyysden mitoitusarvo
$R_{p;d}$	perustuksen sivuun kohdistuvasta maanpaineesta aiheutuvan vastustavan voiman mitoitusarvo
V	pystysuora kuorma tai kuorman pystykomponentti
V_d	V :n mitoitusarvo

Pienet latinalaiset kirjaimet

c	koheesio
c'	tehokas koheesio
c_{cu}	suljettu leikkauslujuus
$c_{cu, d}$	suljetun leikkauslujuuden mitoitusarvo
e	epäkeskeisyys
s	painuma
u	huokosvedenpaine
z	pystysuora etäisyys tai sisäinen momenttivarsi

Kreikkalaiset kirjaimet

α	perustuksen pohjan kaltevuus vaakatasoon nähden
β	maan kaltevuuskulma seinän takana (ylöspäin positiivinen)
g	tilavuuspaino
g'	tehokas tilavuuspaino
g_w	veden tilavuuspaino
$g_{r, H}$	liukuvarmuuden osavarmuusluku

$g_{r; f}$	kuorman osavarmuusluku
$g_{r; R}$	kantokestävyyden osavarmuusluku
d, d_k	rakenteen ja maan välinen kitkakulma
d_d	$d:n$ tai $d_k:n$ mitoitusarvo
$S(z)$	jännitys kohtisuoraan syvyydellä z
f'	leikkauskestävyysskulma tehokkaiden jännitysten perusteella
f_{cv}	kriittisen tilan leikkauskestävyysskulma
$f_{cv; d}$	$f_{cv}:n$ mitoitusarvo
m	suhteellinen momentti
w	mekaaninen raudoitussuhde

1 Johdanto

Olen saanut tämän opinnäytetyön aihe saatiin Insinööritoimisto Pontek Oy:ltä. Pontekin toimitusjohtaja Pertti Määttä ehdotti kulmatukimuurin mitoituspohjan tekoa Pontekin käyttöön. Ympäristöministeriön 1.9.2014 antamien asetusten mukaan uudet hankkeet tulee suunnitella käyttäen Eurokoodeja. Asetukset kumosivat aiemmin voimassa olleet rakentamismääräyskokoelman osat koskien kantavia rakenteita tai pohjarakenteita. Ennen 1.9.2014 aloitetuissa projekteissa on luvallista käyttää projektin aloituksen aikaan voimassa olleita säädöksiä ja asetuksia.

Insinööritoimisto Pontek Oy on vuonna 1966 perustettu henkilökunnan omistama monipuolinen rakennesuunnittelutoimisto. Sen ydinosia ovat rakennetekniikka ja silta-tekniikka. Sivutoimialoina ovat vesirakennustekniikka, rakennuttaminen sekä tutkimus- ja kehitystyö. Kooltaan Pontek on ns. keskisuuri yritys työllistäen n. 25 henkilöä.

1.1 Tavoitteet

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on luoda laskentapohja teräsbetonisen kulmatukimuurin mitoitukseen talonrakennuskohteisiin rakennustoimisto Pontek Oy:lle. Mitoituspohjalla tarkistetaan rakenteen kestävyys maapohjan murtumista, muurin kaatumista ja liukumista vastaan. Rakenteellista mitoitusta varten lasketaan peruslaatan ja pystyosan välisen liitoksen momentin ääriarvot, leikkausvoiman maksimi arvo ja tarvittava raudoituksen pinta-ala tukimuurin juuressa.

Tukimuurit ovat yleisiä rakenteita ja useat Pontekin projekteista sisältävät jonkinlaisen tukimuurin. Tällä hetkellä suunnittelijat mitoittavat tukimuurit tapauskohtaisesti käsinlaskentana. Laskentapohjan tarkoitus on vähentää moneen kertaan tehtävää työtä.

Kirjallisen osuuden tavoitteena on tutkia ja selvittää eurokoodien tuomia vaatimuksia sekä periaatteita kulmatukimuurin mitoitukselle.

1.2 Rajaukset

Tässä insinöörityössä käsitellään vain maanvaraisesti perustettua kulmatukimuuria. Kallion tai paalujen varaan perustettua tukimuuria, ankkurointeja, siipi- ja laippatukimuureja tai kasuuneja ei käsitellä tässä työssä.

Perusolettamuksena on, että pohjavedenpinta on perustamistason alapuolella ja riittävästä vedenpoistosta on huolehdittu täytön puolella.

Onnettomuus-, painuma- sekä kokonaistabiliteettilaskelmia, rajatiloja UPL ja HYD ei käsitellä tässä opinnäytetyössä.

1.3 Eurokoodijärjestelmä

Eurokoodit ovat kokoelma Euroopan Unionin alueella käytössä olevista kantavien rakenteiden suunnittelua koskevista standardeista. Eurokoodien tarkoituksena on yhdistää jäsenmaiden rakenteiden suunnittelun ja rakentamistuotteita määrittävät standardit yhdeksi kokonaisuudeksi. Tarkoituksena on ollut kaupan teknisten esteiden poistaminen ja jäsenmaiden teknisten vaatimusten yhdenmukaistaminen. [1.]

Eurokoodit sisältävät kansalliset liitteet, joiden avulla paikallisten olosuhteiden erityispiirteet voidaan huomioida. Suomessa ympäristöministeriö vahvistaa talonrakennukseen liittyviä kansallisia liitteitä ja Liikenne- ja viestintävirasto infrarakentamiseen liittyviä liitteitä. Esimerkiksi lumi- ja tuulikuorman määrittäminen tapahtuu kansallisten liitteiden avulla. Eurokoodit koostuvat 58:sasta osasta, jotka sisältävät suunnitteluperusteet eri materiaaleille, erilaiset kuormat, kuormien yhdistelyperiaatteet ja materiaalien osavarmuusluvut. Taulukossa 1 on esitetty eurokoodien jakaantuminen. [1.]

Tässä opinnäytetyössä oleellisia standardeja ovat SFS-EN 1997 Geotekninen suunnittelu, SFS-EN 1992 Betonirakenteiden suunnittelu ja SFS-EN 1991 Rakenteiden kuormat. Liikenneviraston julkaisema Eurokoodin soveltamisohje, Geotekninen suunnittelu - NCC7 on infrakohteisiin soveltuva eurokoodien mukainen suunnitteluohje, johon on liittänyt Liikenneviraston antamat kansalliset liitteet. Ympäristöministeriössä asetukset ja ohjeet ovat parhaillaan valmistelussa. Annetut asetukset ovat voimassa, kunnes asianomaiset kansalliset liitteet päivitetään. [1.]

Taulukko 1. Eurokoodien pääosat. [1]

SFS-EN 1990 Eurokoodi 0: Suunnittelun perusteet
SFS-EN 1991 Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormitukset
SFS-EN 1992 Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu
SFS-EN 1993 Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu
SFS-EN 1994 Eurokoodi 4: Teräs-betoniliittorakenteiden suunnittelu
SFS-EN 1995 Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu
SFS-EN 1996 Eurokoodi 6: Muurattujen rakenteiden suunnittelu
SFS-EN 1997 Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu
SFS-EN 1998 Eurokoodi 8: Rakenteiden suunnittelu kestävyys suhteen maanjäristyksessä
SFS-EN 1999 Eurokoodi 9: Alumiinirakenteiden suunnittelu

2 Tukimuuri

2.1 Määritelmä

Tukimuuri on rakenne, jolla tasataan maanpinnan korkeuseroja, kun maaluiskia ei voida tai haluta käyttää. Niiden avulla voidaan rakentaa rakenteita, joilla maamassat pysyvät suuremmassa kulmassa, kuin mitä ne luonnollisessa tilassa kestäisivät. Tukimuurit ovat pääsääntöisesti maanpaineen ja joskus vedenpaineen rasittamia tukirakenteita. Ne voivat esiintyä itsenäisinä rakenteina tai osana jotain muuta rakennelmaa, esimerkiksi talojen kellarimuurina tai siltojen maatukina. Padot muodostavat oman erikoistapauksensa, koska padoissa pääasiallinen kuormitus johtuu vedestä eikä maanpaineesta. Joskus muureja joudutaan perustamaan paalujen varaan tai ankkuroimaan, jos tarvittavaa kestävyyttä ei muuten saavuteta. Oman tukirakennetyypin muodostavat erilaatuiset tukiseinät, esimerkiksi laiturirakenteissa. [3, s.184.]

2.1.1 Massiivinen tukimuuri



Kuva 1. Massiivisen tukimuurin periaatekuva

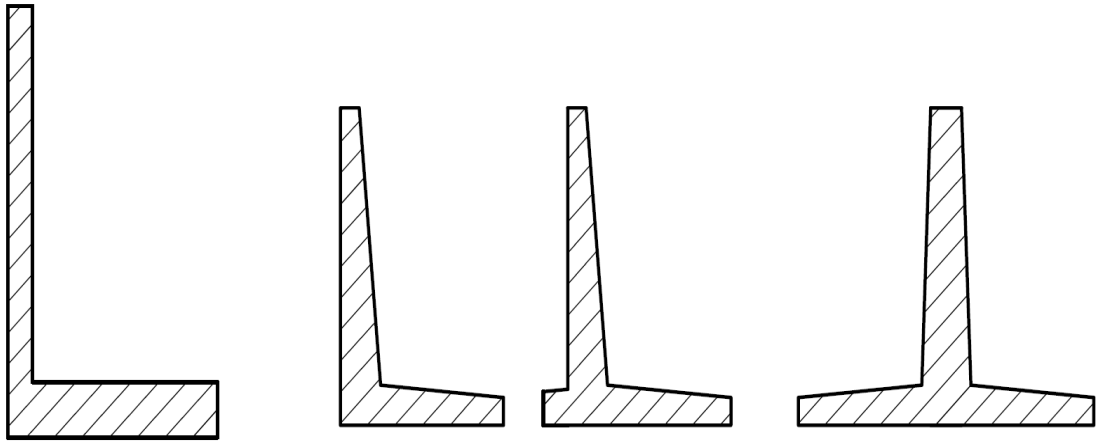


Kuva 2. Esimerkki massiivisesta tukimuurista käytännössä [15]

Massiivinen tukimuri on rakenne, joka saavuttaa tarvittavan vakavuuden oman painonsa avulla kuten kuvissa 1 ja 2 esitetään. Yksinkertaisimmassa muodossaan muuri on koottu kiven tai betonin osista kasamaalla. Massiivinen tukimuri ei tarvitse peruslaattaa täytön puolelle saavuttaakseen tarvittavan stabiliteetin. Massiivisten tukimuurien etuina voidaan pitää sitä, että ne ovat yksinkertaisia ja helppoja rakentaa. Ne eivät ole erityisen alttiita halkeamisvaaralle, joten kunnossapito on halpaa. Tätä muurityyppiä käytetään usein, kun muurin korkeus on suhteellisen matala. [3, s.185.]

Suomessa tätä muurityyppiä käytetään infra- ja talonrakennuskohteissa. Talopuolella pientalokohteissa muurit rakennetaan usein harkoista latomalla. Alle 75 cm muurit eivät välttämättä tarvitse anturoita, mutta sitä korkeammille sekä rinteessä oleville muureille tarvitaan pohjarakenteita. Harkoista tehdyt muurit raudoitetaan ja valetaan tarvittaessa, riippuen maanpaineen ja muiden kuormien suuruudesta. Toimitila- ja infrarakentamisessa käytetään Suomessa kivikoreja. Kivikorit ovat teräksestä tehtyjä onttoja koreja, jotka kootaan työmaalla ja täytetään kivimateriaalilla tarvittavan omanpainon saamiseksi. Kivikoreja rakennetaan teiden varsille asuinalueiden lähellä melusuojaksi. [3, s.186.]

2.1.2 Kulmatukimuuri



Kuva 3. Kulmatukimuurin periaatekuva

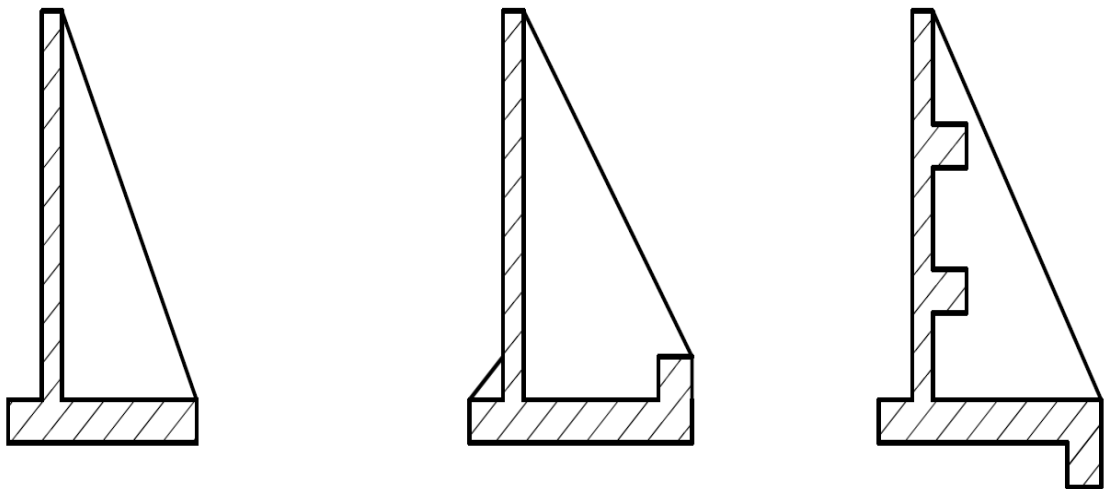


Kuva 4. Esimerkki kulmatukimuurista käytännössä [16]

Kulmatukimuuri on teräsbetonista tehty usein käänteisen T:n tai L:n muotoinen rakenne, joka muodostuu pystysuorasta rintamuurista ja leveästä pohjalaatasta kuten kuvassa 3 ja 4 esitetään. Rintamuurin takana olevat maamassat lepäävät osittain kohtisuoraan pohjalaatan päällä stabiloiden sitä. Kun pohjalaatta on tarpeeksi leveä, voidaan pystyosa tehdä merkittävästi kevyemmäksi kuin massiivinen tukimuuri. Kulmatukimuuri on taloudellinen ratkaisu muurin korkeuden ollessa n. 3-10 m. Mikäli maapohja on riittävän lujaa, voidaan tukimuuri perustaa toispuoleiseksi. Usein kuitenkin on tarpeellista jatkaa anturaa jonkin matkaa rintamuurin etupuolelle maan ominaisuuksista ja kuormituksista riippuen. [3, s.188.]

Tässä opinnäytetyössä keskitytään maanvaraisesti perustettuihin kulmatukimuureihin ja niiden mitoittamiseen.

2.1.3 Laippa- ja siipitukimuuri



Kuva 5. Laippa- ja siipitukimuurin periaatekuva



Kuva 6. Esimerkki siipimuurista käytännössä [17]

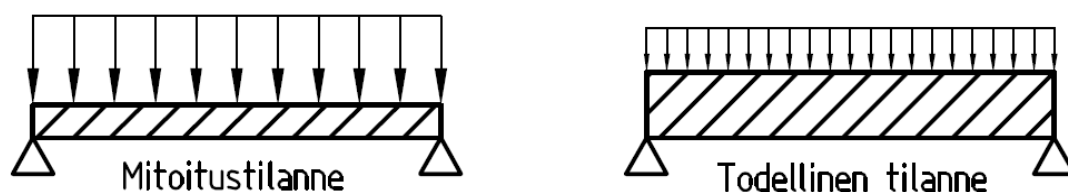
Laippa- ja siipitukimuurit ovat siivillä ja laipoilla jäykistettyjä kulmatukimuureja kuten kuvissa 5 ja 6 näkyy. Niitä käytetään usein vasta kun muurin korkeus on > 5 m. Laippojen ja siipien tarkoituksena on saada aikaan pienemmät taivutusmomentit kuin jäykistämättömissä muureissa. Ne sitovat anturan ja rintamuurin tiukemmin toisiinsa ja toimivat vetojäykisteenä. Rintamuuuri ja antura mitoitetaan laipoille tai siipimuureille tuettuina teräsbetonilaattoina. Siipien ja laippojen väli on usein $1/2 \dots 1/3$ muurin korkeudesta. Siivet ja laipat voidaan tehdä paikallavaluina tai elementteinä, jotka asennetaan työmaalla. [3, s.189.]

3 Rajatilat

3.1 Käyttörajatila

Käyttörajatilat on rajatila, joka liittyy rakenteen tai rakenneosan toimintaan normaalikäytössä, ihmisten mukavuuteen, rakenteen säilyvyyteen tai rakennuskohteen ulkonäköön. Tässä yhteydessä termi "ulkonäkö" liittyy sellaisiin kriteereihin, kuten liialliseen taipumaan tai halkeiluun. Käyttörajatiiloja tarkasteltaessa kriteereinä käytetään värähtelyjä, siirtymiä ja liiallisia vaurioita. Käyttörajatilassa ei käytetä kuormille osavarmuuskertoimia. [8, s.54.]

3.2 Murtorajatila



Kuva 7. Murtorajatila mitoituksen periaatekuva

Kaikki rajatilatarkastelut, jotka liittyvät ihmisten turvallisuuteen tai rakenteiden varmuuteen, ovat murtorajatiiloja. Erityistapauksissa varastoitavan aineen tai tavaran suojaamiseen liittyvät rajatilat luokitellaan murtorajatiiloiksi. Yksinkertaistamisen vuoksi voidaan sortumista edeltävää tilaa tutkia itse sortumisen sijaan. Murtorajatiiloissa käytetään osavarmuuskertoimia, jotka riippuvat tarkasteltavasta murtorajatilasta. Murtorajatilassa kuormia kasvatetaan ja rakenteiden kestävyyttä vähennetään kuvan 7 mukaisella periaatteella. Murtorajatiiloissa geoteknisessä suunnittelussa voidaan käyttää mallikertoimia joko kestävyteen tai kuormien vaikutuksiin, jotta mahdolliset virheet ovat turvallisella puolella. [8, s.53], [11, s.73.]

3.2.1 STR-Rakenteen tai rakenteen osien murtuminen

STR-rajatila on murtorajatila, jossa kuormat ja materiaalit kerrotaan osavarmuusluvuilla. Rajatilassa STR tarkistetaan rakenteen tai rakenteen osan varmuus murtumista, sisäistä vaurioitumista tai liian suurta siirtymätilaa vastaan. Oletuksena on, että rakennusmateriaalien lujuus on määräävä. Esimerkiksi palkit, pilarit, laatat, anturat ja vastaavat rakenteet mitoitetaan STR-rajatilassa. Standardin SFS-EN 1990 mukaan mitoitusehto voidaan ilmaista seuraavasti:

$$E_d \leq R_d \quad (1)$$

missä:

E_d	vaikutuksen, kuten voimasuuren mitoitusarvo
R_d	vastaava kestävyysmitoitussarvo

3.2.2 GEO-Rakennuspohjan murtuminen

Rajatilassa GEO tarkastetaan rakennuspohjan murtuminen ja liian suuret siirtymät, kun oletuksena on, että maakerroksen tai kallion lujuus on merkittävä rakenteen kestävyysmitoitusta kannalta. Kestävyysmitoitusta tapahtuu samalla periaatteella kuin STR-rajatilassa.

3.2.3 EQU-Tasapainon menettäminen

Rajatilassa EQU tarkastetaan rakenteen tai minkä tahansa sen osan staattisen tasapainon menetys, kun rakennusmateriaalien tai maaperän lujuusarvot eivät ole määrääviä tai pysyvien kuormien arvojen tai jakautumisen pienet vaihtelut aiheuttavat merkittäviä muutoksia. Rakenteen staattista tasapainoa tarkasteltaessa tulee osoittaa, että:

$$E_{d, dst} \leq E_{d, stb} \quad (2)$$

missä:

$E_{d, dst}$ tasapainoa heikentävien kuormien vaikutusten
mitoitusarvo

$E_{d, stb}$ tasapainoa parantavien kuormien vaikutusten
mitoitusarvo

Tarvittaessa tasapainoehtoa voidaan täydentää lisätermien, jotka voivat sisältää esimerkiksi jäykkien kappaleiden välisen kitkakertoimen [8, s.78].

3.2.4 UPL-Vedenpaineen aiheuttama noste

Mitoitus nosteelle tehdään tarkistamalla nosteen vaikutus rakenteeseen. Siinä tarkastetaan, että vakauttavien pysyvien pystysuorien kuormien mitoitusarvo ja muun lisäkestävyyden mitoitusarvon summa on suurempi kuin kaatavien pysyvien ja muuttuvien pystysuorien kuormien yhdistelmän mitoitusarvo. Tämä voidaan ilmaista standardin SFS-EN-1997 mukaan seuraavasti:

$$V_{dst,d} < G_{stb,d} + R_d \quad (3)$$

missä:

$$V_{dst,d} = G_{dst,d} + Q_{dst,d} \quad (4)$$

$G_{dst,d}$ epäedullisten pysyvien kuormien suunnittelu-
arvo

$Q_{dst,d}$ epäedullisten muuttuvien kuormien suunnittelu-
arvo

$G_{stb,d}$ edullisten pysyvien kuormien suunnitteluarvo

R_d muun lisäkestävyyden mitoitusarvo

ULP-rajatila tulee kyseeseen esim. kokonaan tai osittain upotettujen rakenteiden tai rakenteiden osia tarkasteltaessa.

4 Kuormat

4.1 Kuormat eurokoodeissa

Siirryttäessä vanhasta normistosta uuteen on syytä olla tarkkana, sillä eurokoodit tehdään aluksi englanniksi, minkä jälkeen ne käännetään suomeksi. Mikäli käännöksessä esiintyy ristiriita, niin englanninkielinen alkuperäinen standardi pätee. Eurokoodit käyttävät hieman erilaista sanastoa kuin mitä Suomen vanhassa normissa Rakentamismääräyskokoelmassa käytetään. Taulukossa 2 on esitetty samaa tarkoittavat sanat molemmilla normeilla.

Taulukko 2. Eurokoodien ja RIL 121-2004 Pohjarakennusohjeet nimitykset samalla asialle. [18]

Eurokoodi	Pohjarakennusohjeet 2004
(maan) leikkauskestävyyskulma	kitkakulma
seinän leikkauskestävyyskulma	seinäkitkakulma
hydraulisen nousun (aiheuttama murtuminen)	hydraulinen murtuminen
nosteen (aiheuttama pohjan nousu)	pohjan nousu

Edulliset kuormat tarkoittavat vakauttavia kuormia ja epäedulliset kuormat tarkoittavat kaatavia kuormia. Jokaisessa tarkastelussa kuormat jaetaan edullisiin ja epäedullisiin kuormiin. Ongelmaksi muodostuvat tapaukset, joissa sama kuorma on sekä edullinen että epäedullinen riippuen tarkasteltavasta rajatilasta. Esimerkkinä tästä kulmatukimuriin liittyen on muurin oma paino. Liukuvarmuustarkastelussa oma paino on edullinen kuorma, mutta kantokestävyyttä tarkasteltaessa oma paino on epäedullinen kuorma. Tällöin pitää soveltaa yhdestä lähteestä tulevan kuorman periaatetta ja käyttää yhtä osavarmuuslukua. [11, s.23.]

Kuorman edustava arvo F_{rep} saadaan kun kuorman ominaisarvo F_k kerrotaan yhdistelykertoimella γ . Kuorman mitoitusarvo F_d saadaan kun edustava arvo kerrotaan osavarmuusluvulla g_f . Osavarmuusluvut ja yhdistelykertoimet vaihtelevat rajatilan ja kuormatyypin mukaan.

Kuorman vaikutusten mitoitusarvo E_d saadaan kun kuorman vaikutusten ominaisarvo E_k kerrotaan osavarmuusluvulla tai soveltamalla osavarmuuslukumenettelyä vaikutusta aiheuttaviin kuormiin.

Maan ominaisuuden mitoitusarvo saadaan jakamalla ominaisuuden ominaisarvo maaparametrin osavarmuusluvulla. Maan ominaisuuksia ovat mm. leikkauskestävyyskulma, koheesio, tilavuuspaino ja suljettu leikkauslujuus.

Kestävyysmitoitussarvo R_d saadaan kahdella eri menetelmällä. Joko laskenta suoritetaan ominaisarvoilla ja kestävyys jaetaan osavarmuusluvulla g_R tai osavarmuuslukuja sovelletaan lujuuteen jakamalla lujuudet osavarmuusluvuilla g_{cu} ja g_f ja suorittamalla laskenta niillä. Esimerkiksi liukuvarmuustarkastelussa kestävyysmitoitussarvo saadaan käyttämällä osavarmuuslukua joko koheesioon tai kitkakulmaan tai käyttämällä osavarmuuslukua laskennan lopputulokseen kohdan 5.3 mukaisesti.

4.2 Maanpaine

Maanpaineella tarkoitetaan maamassan itsensä aiheuttamaa kosketuspainetta rakennetta vastaan. Maanpaineen suuruus, jakautuminen ja suunta riippuvat sekä maan laadusta, kitkasta, koheesiosta, lujuudesta että tukirakenteen liikkeistä. Yleisesti, kun puhutaan maanpaineesta, tarkoitetaan tukirakenteeseen kohdistuvaa vaakasuoraa jännitystä erotuksena pystysuoraan pohjapaineeseen. Maanpaine aiheutuu tavallisesti painovoimasta, mikä synnyttää maa-alkioon rasituksia ja jännityksiä. Maanpaineen suuruuteen vaikuttavat myös ulkoiset kuormat sekä värinä. Tukirakenteen liikkeiden tai liikkumattomuuden perusteella maanpaine jaetaan lepo-, aktiivi- ja passiivipaineeseen. [5, s.433.]

4.2.1 Lepopaine

Maanpaine, jolla siirtymätön maamassa kuormittaa toista maamassaa tai rakennetta, kutsutaan lepopaineeksi. Lujuusopillisesti lepopaine on kosketuspaine, jolla maa-aineksen hiukkasten keskinäinen asema pysyy paikoillaan. Maassa ei tällöin kehity lainkaan liukupintoja ja maamassan oletetaan olevan elastisessa tilassa. Jos oletetaan maa-aines isotrooppiseksi, niin lepopaineen määritelmän mukaan maamassaan voidaan soveltaa yleistettyä Hooken lakia suorakulmaisessa xyz -koordinaatistossa. [6, s.153.]

Maanpaineen kuormittaman tukirakenteen ollessa täysin jäykkä ja liikkumaton lasketaan maanpaine lepopaineena. Vaakasuoran maanpinnan tapauksessa lepopaine voidaan laskea kaavasta:

$$p_o = (g z + q) * K_o \quad (5)$$

missä:

p_o	lepopaine syvyydellä z
g	maan tilavuuspaino
z	etäisyys maanpinnasta
q	tasainen pintakuorma maanpinnalla
K_o	lepopaine kerroin

Lepopaine kerroin K_o voidaan vaakasuoran maanpinnan tapauksessa laskea kaavasta

$$K_o = 1 - \sin(f') * \sqrt{OCR} \quad (6)$$

missä:

f'	leikkauskestävyyskulma tehokkaiden jännitysten perusteella.
------	-------------------------------------------------------------

$\sqrt{\text{OCR}}$

ylikonsolidoitumissuhde

Kaavaa ei käytetä korkeilla OCR-arvoilla. [11, s.94]

Ylikonsolidoitumissuhde on maa-aineksen kokeman suurimman jännityksen suhde nykyiseen tilaan tarkasteltavalla ajanjaksolla. Maa-aineksen, jota ei ole aikaisemmin kuormitettu, ylikonsolidoitumissuhde on 1. Käytännössä tukimuurien kannalta OCR-termin on lähes aina 1, joten esimerkiksi soveltamisohjeissa kuten RIL 207 se on jätetty kirjoittamatta.

Tapauksessa jossa maanpinta viettää seinästä ylös- tai alaspäin kulmassa b , voidaan tehokkaan maanpaineen vaakasuuntainen komponentti laskea kaavasta

$$K_{o,\beta} = K_o * (1 + \sin(b)) \quad (7)$$

Koheesiomaalajit ovat maalajeja, joiden rakeita koossapitävä voima on pääasiassa koheesiota. Koheesiomaalajeja ovat esimerkiksi savet ja hieno siltti. Koheesio on molekyylien välinen voima, joka pitää ainetta kasassa. Koheesiomaassa leikkauskestävyyskulma eli kulma joka muodostuu horisontaalin pinnan ja rakeisen materiaalin välille, kun rakeista materiaalia kaadetaan kartion muotoiseksi kasaksi, voidaan olettaa olevan $\phi' = 0$ joten kaavat 6 ja 7 supistuvat muotoon $K_o = 1$.

Sellaiset maalajit joiden lujuusominaisuudet perustuvat pääasiassa rakeiden väliseen kitkaan ovat kitkamaalajeja. Kitkamaalajeja ovat esimerkiksi hiekka, sora ja louhe. Siltti ja moreeni ovat ns. välimuotomaalajeja, koska niiden lujuusominaisuudet perustuvat sekä kitkaan että koheesioon.

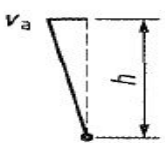
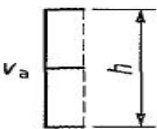
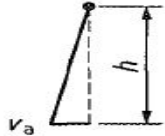
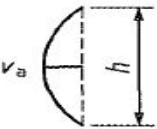
4.2.2 Coulombin maanpaineteoria

Coulombin maanpaineteoria eli klassinen maanpaineteoria perustuu tasoliukupintojen tarkasteluun. Oletuksena on, että maamassa on kimmoisessa tilassa lukuunottamatta määrättyä tasoliukupintaa. Se ei ole tarkka, sillä tarkastelussa huomioidaan vain maamassaan kohdistuvat voimat ja niiden tasapaino, mutta momenttitasapaino jätetään huomioimatta. Teoriassa otetaan huomioon seinäkitka, joka vaikuttaa maamassan ja tukimuurin välillä. Seinäkitkakulmaa merkitään δ :lla. Todellisuudessa seinämän kitka aiheuttaa liukupinnan kaareutumista lähellä alareunaa sekä aktiivi- että passiivipainetapauksissa ja se on tarvittaessa otettava huomioon. Aktiivipaineella kaareutumisen merkitys on vähäinen, mutta passiivipaineella se voi olla huomattava. Tällöin seinänkitkakulmaa saisi olla enintään puolet δ :sta, mikä vastaa täysin kehittyntä kitkaa. Suurilla kitkakulman ja seinäkitkakulman arvoilla passiivipaineen laskennallinen arvo kasvaa merkittävästi todellisuutta suuremmaksi. [6, s.162.]

4.2.2.1 Aktiivinen maanpaine

Jos oletetaan tukirakenne täysin jäykäksi kappaleeksi ja tukirakenne liikkuu seinästä pois päin, niin siihen kohdistuva maanpaine pienenee kunnes maan leikkauslujuus vaarallisimmassa liukupinnassa on täysin kehittynyt. Tätä vastaavaa maanpainetta kutsutaan aktiiviseksi maanpaineeeksi ja rajatilaa aktiiviseksi rajatilaksi, joka edustaa maanpaineen minimiarvoa. Murtohetkellä leikkausjännitys on leikkauslujuuden suuruinen vastustaessaan seinän takaisen maan luisumista murtopintaa pitkin. Aktiivipaineen kehittymiseen tarvittavat seinän siirtymät on esitetty taulukossa 3. [6, s.155.]

Taulukko 3. Tarvittavat tukirakenteen siirtymät aktiivipaineen muodostumiseen Eurokoodi 7:n liitteen C mukaan [11, s.105].

Seinän siirtymän tyyppi		v_a/h löyhä maa %	v_a/h tiivis maa %
a)		0,4 ... 0,5	0,1 ... 0,2
b)		0,2	0,05 ... 0,1
c)		0,8 ... 1,0	0,2 ... 0,5
d)		0,4 ... 0,5	0,1 ... 0,2
missä: v_a on aktiivisen maanpaineen mobilisoiva seinän siirtymä h on seinän korkeus			

Eurokoodin osassa 7 on esitetty kaava aktiivipaineen laskemiseen nomogrammien avulla:

$$s_a(z) = K_a \left[\int \gamma dz + q - u \right] + u - c K_{ac} \quad (8)$$

jossa maa-aineksen integrointi maanpinnasta syvyyteen z

$$K_{ac} = 2\sqrt{[K_a (1+a/c)]} \leq 2,56\sqrt{K_a} \quad (9)$$

missä:

a adheesio eli kahden eri aineen välinen veto-voima (maan ja seinän välissä)

c	maan koheesio eli molekyyliä koossa pitävä voima
K_a	vaakasuuntaisen tehokkaan aktiivisen maanpaineen kerroin
q	pystysuuntainen pintakuorma
u	huokosvedenpaine
z	etäisyys alaspäin seinän yläreunasta mitattuna
g	tuetun maan kokonaistilavuuspaino
$s_a(z)$	jännitys kohtisuoraan seinää vastaan syvyydellä z (aktiivinen rajatila)

Eurokoodi 7 liitteen C esittämällä analyttisellä menetelmällä voidaan laskea tehokas aktiivinen maanpaine seuraavasti:

$$s'_a = K_{ag} (\int g dz - u) + K_{aq} q - K_{ac} c \quad (10)$$

$$K_{ag} = K_n \cdot \cos b \cdot \cos(b - \alpha) \quad (11)$$

$$K_{aq} = K_n \cdot \cos^2 b \quad (12)$$

$$K_{ac} = (K_n - 1) \cdot \cot^2 \phi \quad (13)$$

$$K_n = \frac{1 + \sin(\varphi) \sin(2m_w + \varphi)}{1 - \sin(\varphi) \sin(2m_t + \varphi)} * e^{2(m_t + \beta - m_w - \theta) \tan \varphi} \quad (14)$$

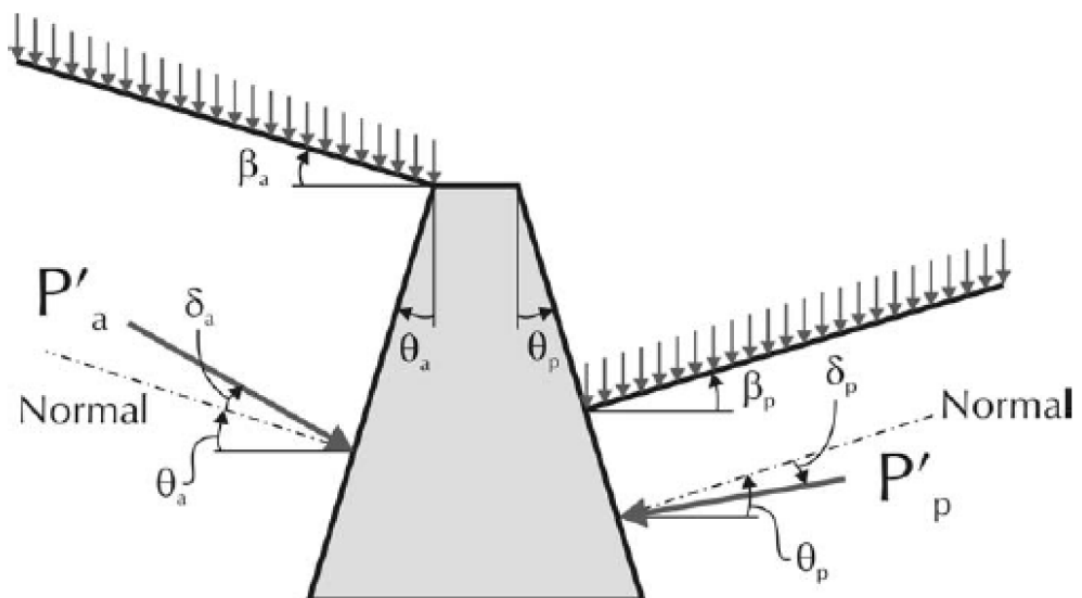
$$2m_t = \cos^{-1}(-\sin b / \sin f) - f - b \quad (15)$$

$$2m_w = \cos^{-1}(-\sin d / \sin f) - f - b \quad (16)$$

missä:

f	maan leikkauskestävyysskula
d	seinän leikkauskestävyysskula
b	maan kaltevuusskula seinän takana
Q	kaltevuusskula pystytasosta

Kuvassa 8 on selitetty analyyttisen menetelmän termejä.



Kuva 8. Analyyttisen menetelmän termejä [14]

Eurokoodi 7:ssä on nomogrammit, joiden avulla voidaan määritellä aktiivinen maanpainekerroin K_a , ja passiivipainekerroin K_p , jos seinäkitkakulma δ tunnetaan. Taulukot oletavat tukimuurin seinän olevan pystysuora, mutta Coulombin maanpaineteorian avulla voidaan laskea myös kaltevien seinien maanpainekertoimet. [13, s.122.]

Aktiivipainekerroin voidaan Coulombin teorialla laskea kaavasta:

$$K_a = \frac{\cos(\varphi + \alpha)^2}{\cos(\alpha)^2 \cdot \cos \delta - \alpha \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \cdot \sin(\varphi - \beta)}{\cos(\delta - \alpha) \cdot \cos(\alpha + \beta)}}\right)^2} \quad (17)$$

missä:

K_a	Coulombin aktiivipainekerroin
δ	seinäkitkakulma
φ	täytön leikkauskestävyyskulma
β	maan kaltevuus
α	tukimuurin pystysuuntainen kaltevuus

Tapauksessa jossa tukimuuri on pystysuora ja maanpinta vaakasuora maanpainekerroin pelkistyy kaavaksi:

$$K_a = (1 - \sin(\varphi)) / (1 + \sin(\varphi)) \quad (18)$$

Puhtaassa koheesiomaassa voidaan aktiivinen maanpaine määritellä seuraavasti:

$$S_a = \gamma z + q - 2c \quad (19)$$

missä:

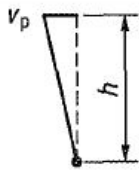
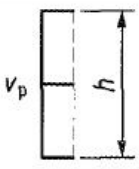
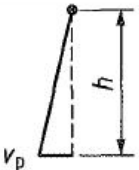
S_a	jännitys syvyydellä z
c	maan koheesio eli molekyylillä koossa pitävä voima
q	pystysuuntainen pintakuorma
z	etäisyys alaspäin seinän yläreunasta mitattuna
g	tuetun maan kokonaistilavuuspaino

4.2.2.2 Passiivinen maanpaine

Passiivinen maanpaine muodostuu kun tukirakenne liikkuu kaltevuutensa säilyttäen ympäröivään maamassaan päin. Maanpaine kasvaa, kunnes maan leikkauslujuus vaarallisimmassa liukupinnassa on täysin kehittynyt. Tätä maanpainetta kutsutaan passiiviseksi maanpaineeksi ja se edustaa maanpaineen maksimiarvoa. Passiivinen maanpaine voi muodostua myös seinän kiertymisestä alapään ympäri täyttöönsä päin. Verrattuna aktiiviseen maanpaineeseen mobilisoitumiseen tarvittavat siirtymät ovat huomattavasti suuremmat.

Taulukossa 4 on esitetty tarvittavat siirtymät passiivisen maanpaineen muodostumiseen.

Taulukko 4. Tarvittavat tukirakenteen siirtymät passiivipaineen muodostumiseen Eurokoodi 7 liitteen C mukaan [11, s.106].

Seinän siirtymän tyyppi		v_p/h (v/h $0.5\sigma_p$)%	v_p/h (v/h $0.5\sigma_p$) %
		löyhä maa	tiivis maa
a)		7 (1,5) ... 25 (4,0)	5 (1,1) ... 10 (2,0)
b)		5 (0,9) ... 10 (1,5)	3 (0,5) ... 6 (1,0)
c)		6 (1,0) ... 15 (1,5)	5 (0,5) ... 6 (1,3)
missä: v on seinän siirtymä v_p on tehokkaan passiivisen maanpaineen mobilisoiva seinän siirtymä h on seinän korkeus σ_p on täysin mobilisoitu passiivinen maanpaine			

Eurokoodi 7:ssä on esitetty kaava passiivipaineen nomogrammien avulla laskemiseen:

$$\sigma_p(z) = K_p \left[\int \gamma_{dz} + q - u \right] + u + c K_{pc} \quad (20)$$

missä maa-aineksen integrointi maanpinnasta syvyyteen z

$$K_{pc} = 2\sqrt{[K_p (1+a/c)]} \leq 2,56 \sqrt{K_p} \quad (21)$$

missä:

a adheesio (maan ja seinän välissä)

c	maan koheesio
K_p	vaakasuuntaisen tehokkaan passiivisen maan- paineen kerroin
q	pystysuuntainen pintakuorma
z	etäisyys alaspäin seinän yläreunasta mitattuna
g	tuetun maan kokonaistilavuuspaino
$s_p(z)$	kokonaisjännitys kohtisuoraan seinää vastaan syvyydellä z

Eurokoodi 7 liitteen C esittämällä analyttisellä menetelmällä voidaan laskea tehokas passiivinen maanpaine seuraavasti:

$$s'_p = K_{pg} (\int g dz - u) + K_{pq} q + K_{pc} c \quad (22)$$

$$K_{pg} = K_n \cdot \cos b \cdot \cos(b - Q) \quad (23)$$

$$K_{pq} = K_n \cdot \cos^2 b \quad (24)$$

$$K_{pc} = (K_n - 1) \cdot \cot f \quad (25)$$

$$K_n = \frac{1 - \sin(\varphi) \cdot \sin(2m_w - \varphi)}{1 + \sin(\varphi) \cdot \sin(2m_t - \varphi)} \cdot e^{-2(m_t + \beta - m_w - \theta) \tan \varphi} \quad (26)$$

$$2m_t = \cos^{-1}(-\sin b / -\sin f) + f - b \quad (27)$$

$$2m_w = \cos^{-1}(\sin d / \sin f) + f + b \quad (28)$$

missä:

f	maan leikkauskestävyyskulma
d	seinän leikkauskestävyyskulma
b	maan kaltevuuskulma seinän takana
Q	kaltevuuskulma pystytasosta

Passiivinen maanpainekerroin voidaan laskea klassisen maanpaineteorian mukaan:

$$K_p = \frac{\cos(\varphi - \alpha)^2}{\cos(\alpha)^2 \cdot \cos \delta - \alpha \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi - \delta) \cdot \sin(\varphi + \beta)}{\cos(\delta - \alpha) \cdot \cos(\alpha + \beta)}}\right)^2} \quad (29)$$

Tapauksessa, jossa tukimuuri on pystysuora ja maanpinta vaakasuora maanpainekerroin voidaan laskea kaavasta

$$K_p = (1 + \sin(f)) / (1 - \sin(f)) \quad (30)$$

Puhtaassa koheesiomaassa voidaan passiivinen maanpaine määritellä seuraavasti:

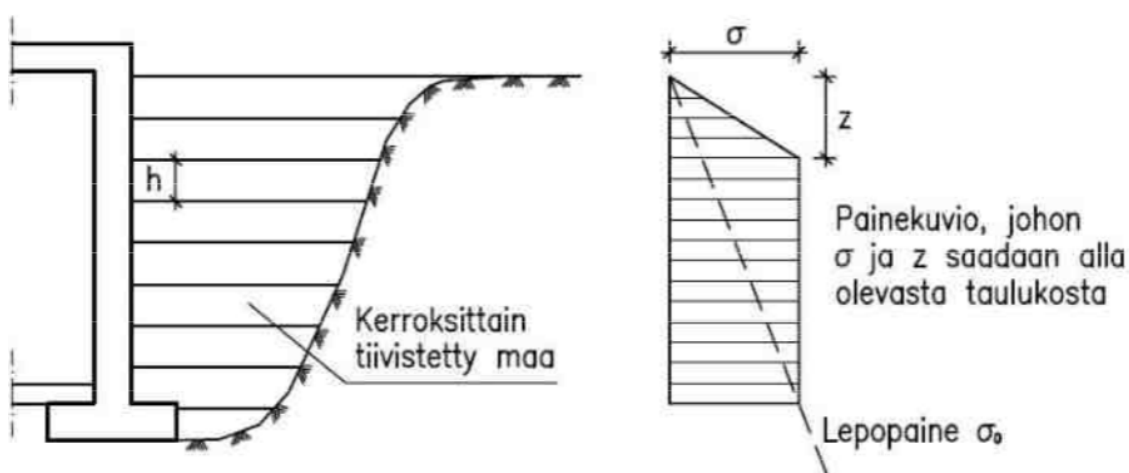
$$S_p = gZ + q + 2c \quad (31)$$

missä:

S_p	jännitys syvyydellä z
c	maan koheesio eli molekyyliä koossa pitävä voima
q	pystysuuntainen pintakuorma
z	etäisyys alaspäin seinän yläreunasta mitattuna

4.2.3 Tiivistyskuorma

Tiivistämisellä pyritään saamaan maa-aines sellaiseen tilaan, missä se vastaa täytteelle asetettuja rakenteellisia vaatimuksia. Sillä pyritään joko mahdollisimman suureen kuiva-tilavuuspainoon tai pieneen vedenläpäisevyyteen. Käytännössä tiivistämisellä halutaan rajoittaa täytönpuolella tapahtuvia painumia ja muodonmuutoksia. Tukiseinän takana olevan täytön tiivistäminen lisää maanpainetta ja maanpaineisää voidaan pitää pysyvänä kuormana. Tiivistyskalustolla, tiivistettävällä materiaalilla sekä kerroksen paksuudella on merkitystä maanpaineen suuruuteen. Tiivistettäessä paksuja kerroksia tiivistyksen dynaamiset vaikutukset ovat vähäisiä. Kuvassa 9 on esitetty maanpaine kuvion muutos siirtymättömän rakenteen tapauksessa, mutta samaa periaatetta voidaan soveltaa myös myötäväille rakenteille. [7, s.193], [5, s.481.]



Tiivistyskone	Tiivistyskertojen määrä	Kerros-paksuus h [m]	z [m]	σ [kPa]
Täryjyrä, 3000kg	6	0,40	0,5	19
Täryjyrä, 400kg	4	0,35	0,5	16
Täryjyrä, 100kg	4	0,20	0,5	12

Kuva 9. Tiivistyksen aiheuttama maanpaine kuorman lisäys RIL 121-2004 Pohjarakennusohjeet mukaan. [19]

4.3 Pysyvät kuormat

Eurokoodin standardi SFS-EN 1991 määrittelee pysyvän kuorman kuormaksi, jonka suuruus ja suunta pysyvät lähes samoina koko tarkasteltavan ajanjakson ajan. Pysyväksi kuormaksi lasketaan myös sellainen kuorma, jonka muutos on monotonista tiettyyn raja-arvoon asti. Pysyvän kuorman tunnuksena käytetään G-kirjainta. Jos mitoitetaan osavarmuuslukumenetelmällä, niin murtorajatilassa kuormat tai kuormien vaikutus kerrotaan osavarmuusluvulla. Pysyviä kuormia ovat esimerkiksi rakenteen omapaino, pakkovoimat sekä epätasaisen painuman aiheuttamat voimat. [9, s.21.]

4.4 Muuttuvat kuormat

Muuttuviksi kuormaksi luokitellaan kaikki sellaiset kuormat, joiden suuruus, suunta tai paikka voivat vaihdella. Eurokoodeissa muuttuvan kuorman tunnus on Q-kirjain. Kaikki hyötykuormat ovat muuttuvia kuormia. Suomen kansallisessa liitteessä on määritelty rakennusten välipohjien, parvekkeiden, portaiden, varastoiden ja liikennöintialueiden hyötykuormien minimiarvot. Muuttuvia kuormia ovat esimerkiksi hyöty-, lumi-, tuuli-, liikenne- ja varastointikuormat. [9, s.22]

4.5 Onnettomuuskuormat

Eurokoodin osa SFS-EN 1991-7 mukaan onnettomuuskuormia ovat esimerkiksi maanjäristyksestä johtuvat kuormat, liikenteestä tulevat törmäyskuormat tai räjähdyksestä johtuvat kuormat. Onnettomuuskuorman tunnus on A kirjain. Tukimuurin ollessa kyseessä voidaan täytön puolelle mahdollisesti tulevaa veden- tai routapainetta pitää onnettomuuskuormana. Käytettävät säännöt ja toimintaperiaatteet sovitaan hankekohtaisesti tilaajan ja asianmukaisen viranomaisen kanssa. Onnettomuuskuormat voivat olla määritelmästä tai määriteltävissä olevista syistä aiheutuvia kuormia. [9, s.23.]

Tämän opinnäytetyön laskelmissa ei käsitellä onnettomuuskuormia.

5 Mitoitus

5.1 Mitoitustavat

Eurokoodeissa on esitetty osavarmuuslukumenettely ja kolme mitoitus tapaa (DA = Design Approach). Mitoitus tapojen erona on käytettävien osavarmuuslukujen yhdistelmä. Osavarmuuslukuja käytetään kuormille tai kuormien vaikutuksille, kestävyydelle sekä maaparametreille. Suomen kansallisen liitteen mukaan Suomessa ei käytetä mitoitus tapaa 1. Suomessa käytetään tukirakenteiden, antura-, laatta- ja paaluperustusten sekä ankkureiden mitoituksessa mitoitus tapaa 2, jota voidaan soveltaa kahdella tavalla ja ne erotetaan toisistaan merkinnöillä 2 ja 2*. Ne eroavat toisistaan siinä, missä vaiheessa laskentaa osavarmuuslukuja käytetään. Mitoitustavassa 2 osavarmuusluvulla kerrotaan kuormat ja suoritetaan laskenta niillä ja mitoitustavassa 2* käytetään ominaiskuormia ja osavarmuuslukuja sovelletaan vasta kuormien vaikutuksiin. Mitoitus tapaa 2* käytettäessä on syytä kiinnittää erityistä huomiota perustusten vakavuuteen. Mitoitustavassa 2* kaikki pysyvät kuormat oletetaan epäedullisiksi. Mitoitus tapaa 3 käytetään Suomessa luiskien ja kokonaisvakavuuden mitoituksessa. [11, s.29.]

Riittävän kestävyys osoittamiseksi tulee osoittaa, että liiallisia muodonmuutoksia tai murtoa ei tapahdu seuraavalla osavarmuuslukujen yhdistelmällä:

$$A1'' + '' M1'' + '' R2 \quad (32)$$

missä:

A1	kuormien tai niiden vaikutuksen osavarmuusluku
M1	maaparametrien osavarmuusluku
R2	kestävyyden osavarmuusluku

Taulukoissa 5 on esitetty talonrakennuskohteissa käytettävät kuormien osavarmuusluvut rajatilassa EQU, taulukossa 6 on esitetty rajatilojen STR ja GEO osavarmuusluvut ja taulukossa 7 on esitetty kestävyysluokien osavarmuusluvut standardin SFS-EN 1997-1 mukaisesti.

Taulukko 5. Kuormien ja maaparametrien osavarmuusluvut talonrakennuskohteissa Suomen kansallisen liitteen mukaan

A.1 (FI) KUORMIEN OSAVARMUUSLUVUT γ_F (EQU)

<i>KUORMA</i>	<i>MERKINTÄ</i>	<i>ARVO</i>
---------------	-----------------	-------------

Pysyvä:

Epäedullinen	$\gamma_{G,dst}$	1,1 K_{FI}
Edullinen	$\gamma_{G,stb}$	0,9

Muuttuva:

Epäedullinen	$\gamma_{Q,stb}$	1,5 K_{FI}
Edullinen	$\gamma_{Q,stb}$	0

Epäedullinen=Kaatava

Edullinen= Vakauttava

Luotettavuusluokassa RC3 $K_{FI} = 1,1$

Luotettavuusluokassa RC2 $K_{FI} = 1$

Luotettavuusluokassa RC1 $K_{FI} = 0,9$

A.2 (FI) MAAPARAMETRIEN OSAVARMUUSLUVUT γ_M (EQU)

<i>MAAPARAMETRI</i>	<i>MERKINTÄ</i>	<i>ARVO</i>
---------------------	-----------------	-------------

Leikkauskestävyyskulma ^a	$\gamma_{\varphi'}$	1,25
Tehokas koheesio	γ_c	1,25
Suljettu leikkauslujuus	γ_{cu}	1,5
Yksiaksiaalinen puristuslujuus	γ_{qu}	1,5
Tilavuuspaino	γ_v	1,0

^a Tällä varmuusluvulla jaetaan $\tan(\varphi')$

Epäedullinen=Kaatava

Edullinen= Vakauttava

Taulukko 6. Kuormien sekä maaparametrien osavarmuusluvut talonrakennuskohteissa Suomen kansallisen liitteen mukaan

A.3 (FI) KUORMIEN(γ_F) TAI KUORMIEN VAIKUTUSTEN (γ_E) OSAVARMUUSLUVUT (STR/GEO)

KUORMA	MERKINTÄ	SARJA	
		A1	A2
MERKINTÄ			
Pysyvä:			
Epädullinen			
Yht. 6.10a		1,35 K _{FI}	
Yht. 6.10b	γ _{Gkj,sup}	1,15 K _{FI}	
Yht. 6.10		1,3 K _{FI}	1,0 K _{FI}
Edullinen			
Yht. 6.10a		0,9	
Yht. 6.10b	γ _{Gkj,inf}	0,9	
Yht. 6.10			1
Muuttuva			
Epäedullinen			
Yht. 6.10b	γ _Q	1,5 K _{FI}	
Yht. 6.10			1,3 K _{FI}
Edullinen			
		0	0

A.4 (FI) MAAPARAMETRIEN OSAVARMUUSLUVUT (γ_M) OSAVARMUUSLUVUT (STR/GEO)

MAAPARAMETRI	MERKINTÄ	SARJA	
		M1	M2
Leikkauskestävyyskulma ^a	$\gamma_{\varphi'}$	1	1,25
Tehokas koheesio	$\gamma_{c'}$	1	1,25
Suljettu leikkauslujuus	γ_{cu}	1	1,5
Yksiaksiaalinen puristuslujuus	γ_{qu}	1	1,5
Tilavuuspaino	γ_v	1	1,0

^a Tällä varmuusluvulla jaetaan $\tan(\varphi')$

Epäedullinen=Kaatava

Edullinen= Vakauttava

Taulukko 7. Kestävyyksien osavarmuusluvut talonrakennuskohteissa Suomen kansallisen liitteen mukaan

A.5 (FI) ANTURA- JA LAATTAPERUSTUSTEN KESTÄVYYDEN OSAVARMUUSLUVUT (γ_R)

KESTÄVYYS	MERKINTÄ	SARJA R2
Kantokestävyys	$\gamma_{R,V}$	1,55
Liukuminen	$\gamma_{R,H}$	1,1

A.13 (FI) TUKIRAKENTEIDEN KESTÄVYYDEN OSAVARMUUSLUVUT (γ_R)

KESTÄVYYS	MERKINTÄ	SARJA R2
Kantokestävyys	$\gamma_{R,V}$	1,55
Liukuminen	$\gamma_{R,H}$	1,1
Maan kestävyys	$\gamma_{R,C}$	1,5

Kuormakerroin K_{FI} riippuu seuraamusluokasta. Taulukossa 8 on esitetty seuraamusluokan sekä luotettavuusluokan vaikutus kuormakertoimeen.

Taulukko 8. Kuormakertoimen valitseminen.

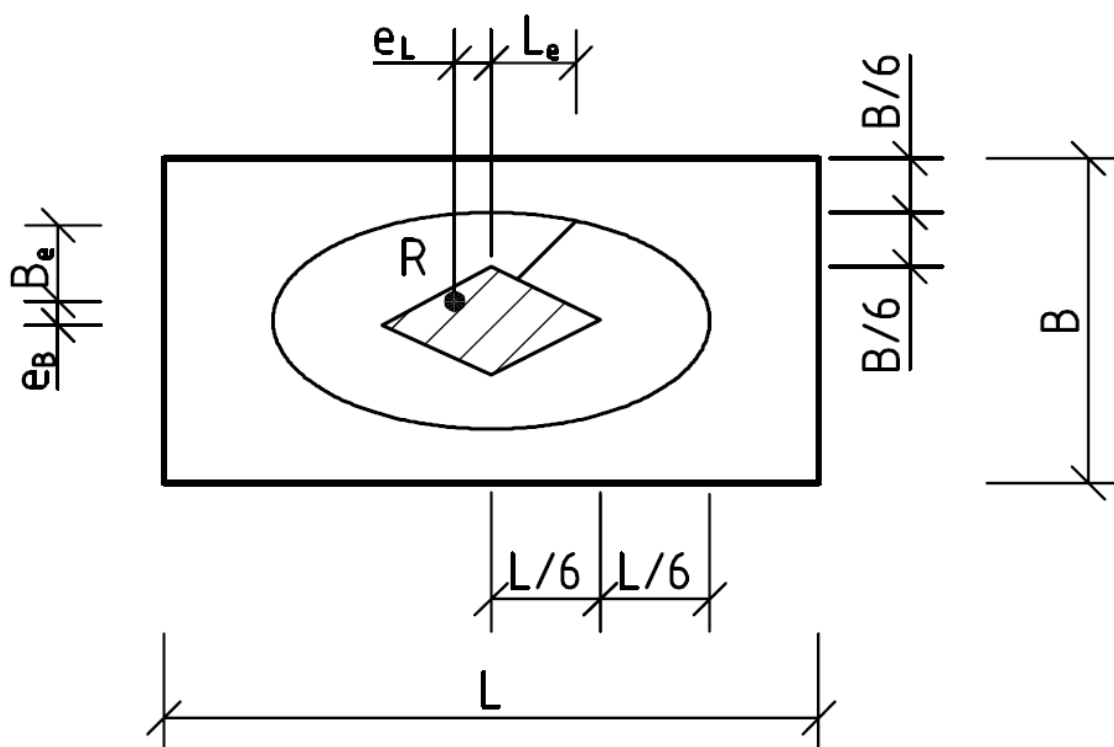
Seuraamusluokka	Luotettavuusluokka	Kuvaus	K_{FI}
CC3	RC3	Suuret seuraamukset hengemenetysten tai hyvin suuret taloudellisten tai ympäristövahinkojen takia	1,1
CC2	RC2	Keskisuuret menetykset hengenmenetysten tai merkittävien taloudellisten tai ympäristövahinkojen takia	1
CC1	RC1	Vähäiset seuraamukset hengenmenetysten tai pienten taloudellisten tai ympäristövahinkojen takia	0,9

Käytettäessä mitoitus tapaa 2* maanvaraisten anturoiden kanssa epäedullisimmalla kuormitusyhdistelmällä ei sallita suurempia epäkeskisyyksiä kuin 1/3 anturan leveydestä. Tämä ehto toteutuu kun kuormituksen resultantti sijaitsee sellaisen ellipsin sisällä, jonka puoliakselit ovat peruslaatan sivumittojen kolmannekset ja keskipiste peruslaatan keskipiste. Jos resultantti sijaitsee kuvan 10 ellipsillä aiheuttaa se kolmiomaisen paineen anturan pohjalla ja jos se sijaitsee viivoitetulla alueella, on koko pohjan ala puristettu. Viivoitetun alueen reunalla sijaitseva resultantti aiheuttaa nollapaineen anturan takareunan kohdalla. Viivoitettu ala on tämän perustuksen ns. sydänkuvio. [7, s.109.]

Kuvan 10 ellipsi voidaan ilmaista matemaattisesti kaavalla:

$$(L_e/L)^2 + (B_e/B)^2 = 1/9 \quad (33)$$

Kuva 10. Suorakaideanturan epäkeskisyydet [7, s.110]



Mitoitustapoja 1 ja 3 ei käsitellä tässä opinnäytetyössä.

5.2 Kantokestävyys

Kantokestävyys voidaan määritellä eri menetelmillä. Eurokoodeissa on ohjeet analyyttiseen menetelmään, puolikokeelliseen menetelmään ja ohjeelliseen menetelmään käyttäen otaksuttua kantokestävyyttä. Tässä opinnäytetyössä keskitytään analyyttiseen menetelmään. Kantokestävyyttä laskettaessa tulee käyttää maakerrosten tehokkaita ominaisuuksia. Kaikissa kantokestävyystarkasteluissa tulee toteutua seuraava epäyhtälö:

$$V_d < R_d \quad (34)$$

missä:

V_d perustuksen pohjaan vaikuttavan pystykuorman mitoitusarvo

R_d kantokestävyuden mitoitusarvo

Eurokoodien mukaan tulee kuorman mitoitusarvon sisältää perustuksen paino, taustatäyttömateriaalin paino, vedenpaineet ja kaikki maanpaineet. [11, s.58.]

Kantokestävyyttä määriteltäessä tulee ottaa huomioon mitoituskuormien kaltevuus ja epäkeskeisyys, perustuksen dimensiot, maanpinnan kaltevuus, pohjavedenpaineet ja hydrauliset gradientit eli ero vedenpaineissa kahden tarkastelukohdan välillä ja maapohjan kerroksellisuus. [11, s.59.]

Vaakakuormalla on merkittävä vaikutus kantokestävyYTEEN. Jos kuormaresultantti sijaitsee epäkeskeisesti perustuksella, määritetään kuormaresultantin suhteen symmetrinen pinta-ala, jota kutsutaan tehokkaaksi pinta-alaksi. Kuorman epäkeskeisyyden kasvaessa perustuksen tehokas pinta-ala pienenee. Kuvassa 11 esitetään suorakulmaisen anturan tehokas ala. [7, s.106.]

Kuorman epäkeskeisyys voidaan laskea anturan painopisteeseen vaikuttavan momentin ja pystykuorman avulla suorakulmaisen perustuksen tapauksessa seuraavasti:

$$e_L = M_L / V \quad \text{epäkeskeisyys pituuden } L\text{-suunnassa} \quad (35)$$

$$e_B = M_B / V \quad \text{epäkeskisyys pituuden B-suunnassa} \quad (36)$$

missä:

e epäkeskisyys tarkasteltavassa suunnassa

M perustuksen painopisteen suhteen laskettu momentti tarkasteltavassa suunnassa

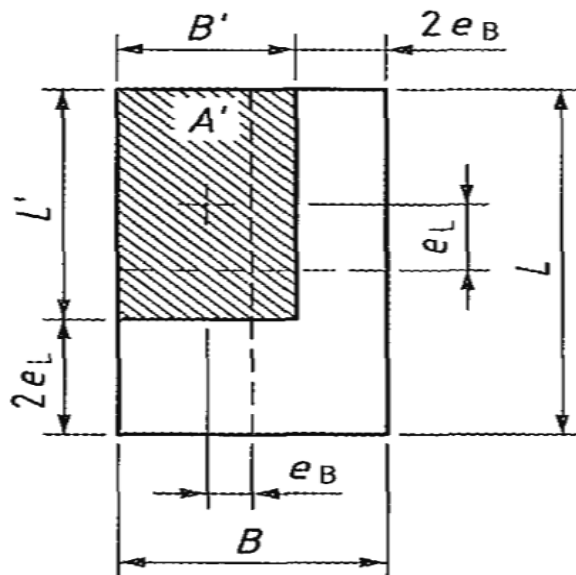
V pystykuorman resultantti

Anturan tehokkaaksi alaksi saadaan siis:

$$B' = B - 2 * e_B \quad (37)$$

$$L' = L - 2 * e_L \quad (38)$$

$$A' = B' * L' \quad (39)$$



Kuva 11. Tehokkaan pinta-alan periaatekuva suorakaideperustukselle [7, s.106]

5.2.1 Kantokestävyys suljetuissa olosuhteissa

Perustettaessa maanvaraisesti koheesiomaalle voidaan käyttää suljettujen olosuhteiden kantokestävyyskaavaa.

Kantokestävyysmitoitussarvo voidaan laskea kaavasta:

$$R/A' = (p+2) \cdot c_u \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q \quad (40)$$

missä:

- Kerroin perustuksen pohjapinnan kaltevuudelle

$$b_c = 1 - 2a/(p+2) \quad (41)$$

- Kertoimet perustuksen muodolle ovat:

$$s_c = 1 + 0,2(B'/L') \text{ suorakaiteelle} \quad (42)$$

$$s_c = 1,2 \quad \text{neliölle tai ympyrälle} \quad (43)$$

- Vaakakuorman H aiheuttama kuorman kaltevuus

$$i_c = \frac{1}{2} (1 + \sqrt{1 - (H/A' \cdot c_u)}) \quad (44)$$

Kerroin i_c huomioi vaakakuorman H aiheuttaman kuorman kaltevuuden, jolloin epäyhtälön $H \leq A' \cdot c_u$ on toteuduttava.

5.2.2 Kantokestävyys avoimissa olosuhteissa

Perustettaessa maanvaraisesti kitkamaalle voidaan käyttää avoimien olosuhteiden kantokestävyyskaavaa.

Kantokestävyysmitoitussarvo voidaan laskea kaavasta:

$$R/A' = c' * N_c * b_c * s_c * i_c + q' * N_q * b_q * s_q * i_q + 0,5 * g' * B' * N_g * b_g * s_g * i_g \quad (45)$$

missä:

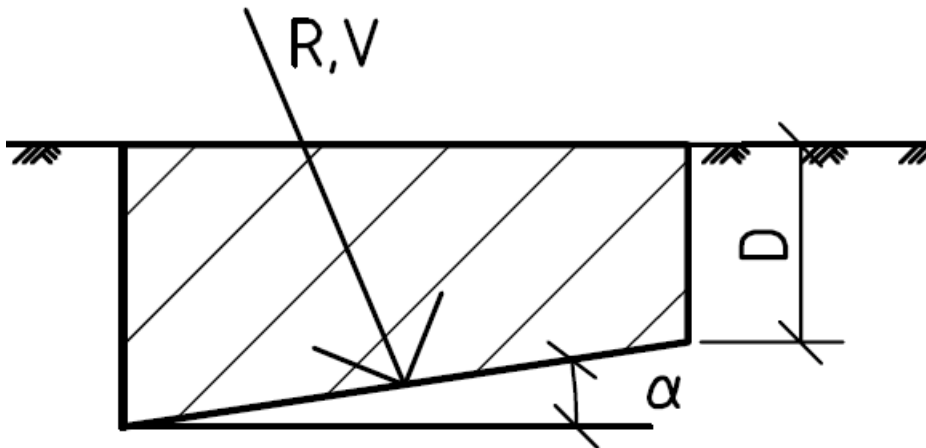
- Kertoimet kantokestävyydelle

$$N_q = e^{p \cdot \tan(f')} \cdot \tan^2(45 + f' / 2) \quad (46)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \cot(f') \quad (47)$$

$$N_g = 2(N_q - 1) \cdot \tan(f'), \text{ missä } d \geq f' / 2 \text{ (karhea pohja)} \quad (48)$$

- Kertoimet perustuksen pohjan kaltevuudelle. Kuvassa 12 on esitetty, mitä kerroin a tarkoittaa.



Kuva 12. Perustuksen pohjan kaltevuuden vaikutus [7, s.106]

$$b_q = b_g = (1 - a \cdot \tan(f'))^2 \quad (49)$$

$$b_c = b_q - (1 - b_q) / (N_c \cdot \tan(f)) \quad (50)$$

- Kertoimet perustuksen muodolle ovat:

$$s_q = 1 + (B' / L') \sin(f') \quad \text{suorakaiteelle} \quad (51)$$

$$s_q = 1 + \sin(f') \quad \text{neliölle tai ympyrälle} \quad (52)$$

$$s_g = 1 - 0,3 \cdot (B' / L') \quad \text{suorakaiteelle} \quad (53)$$

$$s_g = 0,7 \quad \text{neliölle tai ympyrälle} \quad (54)$$

$$s_c = (s_q \cdot N_q - 1) \cdot (N_q - 1) \quad \text{suorakaiteelle, neliölle ja ympyrälle} \quad (55)$$

- Vaakakuorman H aiheuttamalle kuorman kaltevuudelle.

$$i_q = [1 - H / (V + A' \cdot \cot(f'))]^m \quad (56)$$

$$i_g = [1 - H / (V + A' \cdot \cot(f'))]^{m+1} \quad (57)$$

$$i_c = i_q - (1 - i_q) / N_c \cdot \tan(f') \quad (58)$$

missä:

$$m = m_B = [2 + (B' / L')] / [1 + (B' / L')] \quad \text{kun H vaikuttaa } B' \text{ -suunnassa} \quad (59)$$

$$m = m_L = [2 + (L' / B')] / [1 + (L' / B')] \quad \text{kun H vaikuttaa } L' \text{ -suunnassa} \quad (60)$$

Tapauksissa, joissa kuorman vaakakomponentti vaikuttaa suunnassa, joka muodostaa kulman Q perustuksen tehokkaan pituuden L' :n suunnan kanssa, voidaan m laskea kaavalla:

$$m = m_Q = m_L \cdot \cos^2(Q) + m_B \cdot \sin^2(Q) \quad (61)$$

5.3 Liukumiskestävyys

Eurokoodien mukaan liukumurtuma perustusten pohjaa pitkin tulee tarkistaa, ellei kuormitus ole kohtisuora perustusten pohjaa vasten.

Rakenteen liukuvarmuutta tarkasteltaessa tulee seuraavan epäyhtälön olla voimassa:

$$H_d < R_d + R_{p;d} \quad (62)$$

missä:

H_d	perustuksiin kohdistuvien vaakakuormien mitoitusarvo
R_d	liukumiskestävyuden mitoitusarvo
$R_{p;d}$	perustuksen sivuun kohdistuva liukumista vastustava voima

$R_{p;d}$ - arvoja käytettäessä tulee ottaa huomioon suunniteltu käyttöikä. Liukumista vastustava voima kuten tukimuurin etupuolessa oleva maataäyttö, voi hävitä eroosion tai ihmisen toiminnan seurauksena. Siksi Suomessa liukumista vastustava voima jätetään yleensä huomioimatta mitoituksessa. [7.]

Avoimissa olosuhteissa kestävyuden mitoitusarvo R_d voidaan laskea kohdistamalla osavarmuusluvut maapohjan ominaisuuksiin seuraavasti [11,s. 59]:

$$R_d = (V_d \cdot \tan(d_k)) / g_{r;H} \quad (63)$$

missä:

R_d	liukumiskestävyyden mitoitusarvo
V_d	perustuksen pohjaan pystysuoraan vaikuttavan voiman mitoitusarvo
d_k	maan ja perustuksen välinen leikkauskestävyyskulma
$g_{R;H}$	liukumiskestävyyden osavarmuusluku

Kulma d_k voidaan eurokoodien mukaan olettaa yhtä suureksi kuin tehokkaan leikkauskestävyyskulman kriittisen tilan mitoitusarvo $f_{cv;D}$ paikalla valetuilla betoniperustoilla ja yhtä suureksi kuin $2/3 f_{cv;D}$ sileillä elementtiperustoilla. Tehokasta koheesiota c' ei oteta huomioon.

Suljetuissa olosuhteissa kestävyyden R_d mitoitusarvo tulee laskea kohdistamalla osavarmuusluvut joko maapohjan ominaisuuksiin tai maapohjan kestävyteen seuraavasti:

$$R_d = A' * c_{cu;d} \quad (64)$$

tai

$$R_d = (A' * c_{u;k}) / g_{R;H} \quad (65)$$

Mikäli veden tai ilman tunkeutuminen suljetussa tilassa olevan savimaan ja perustuksen pohjan väliselle pinnalle on mahdollista, tulee seuraava ehto tarkistaa:

$$R_d \leq 0,4 * V_d \quad (66)$$

Ehto voidaan jättää tarkistamatta vain, jos maan ja perustuksen välisen raon syntyminen on estetty alipaineella alueilla, missä ei ole positiivista pohjapainetta.

5.4 Kaatuminen

Rajatilan EQU osavarmuusluvuilla tulee osoittaa, että rakenne säilyttää staattisen tasapainon kaikilla kuormitusyhdistelmillä. Kohdan 4.4 mukaisen epäyhtälön tulee aina olla voimassa. Momentit lasketaan tukimuurin kaatumispisteen suhteen.

Perustettaessa maanvaraisesti voidaan kaatumisvarmuus todeta rajoittamalla epäkeisyyks pienemmäksi kuin $B/3$, jolloin vähintään puolet anturan leveydestä on puristettu.

5.5 Kokonaisvakavuus

Kokonaisvakavuus MRT-rajatilassa tulee tarkistaa perustusten kanssa tai ilman erityisesti seuraavissa tilanteissa:

- lähellä luonnollista tai rakennettua luiskaa tai luiskassa
- lähellä kaivantoa tai tukiseinää
- lähellä jokea, kanavaa, järveä, tekojärveä tai merenrantaa
- lähellä kaivostyömaata tai maanalaisia rakenteita

Myös KRT-rajatilassa tulee osoittaa, että muodonmuutokset maapohjassa eivät ylitä sallittuja rajoja [11, s.108].

Tästä opinnäytetyöstä on rajattu stabiiliteettilaskelmat pois.

5.6 Painumat

Käyttörajatilatarkasteluista painumatarkastelu on yksi tärkeimmistä. Laskettuja painuman arvoja ei voi kuitenkaan pitää tarkkoina Eurokoodi 7:n mukaan, sillä ne antavat vain likimääräisen arvon. Painumalaskelmat tulee tehdä aina pehmeälle savimaalle. [11, s.60.]

Eurokoodien mukaan painumalaskelmien tulee sisältää sekä hitaasti tapahtuva että välitön painuma. Täysin vedellä kyllästetyssä sekä osittain kyllästetyssä maassa otetaan seuraavat kolme komponenttia huomioon:

S_0	alkupainuma
S_1	konsolidaatiopainuma
S_2	viruman aiheuttama painuma

Kokonaispainumaksi saadaan:

$$S = S_0 + S_1 + S_2 \quad (67)$$

Eurokoodi 7:n liitteessä F on esitetty sovellettu kimmomenetelmä kokonaispainuman arvioimiseksi kitka- ja koheesiomaissa.

Tästä opinnäytetyöstä on rajattu painumalaskelmat pois.

5.7 Rakenteellinen mitoitus

5.7.1 MRT

Kulmatukimuurin betonirakenteet mitoitetaan rakenteellisesti kestäväksi niille tulevat voimat. Kriittisin kohta on tavallisesti rintamuurin ja anturan liitoskohta, johon mitoitetaan tarvittava vetorautoite ja tukimuurin muiden osien pintoihin asennetaan usein raudoiteverkko. Tarvittava raudoitteen pinta-ala voidaan määrittää seuraavasti:

$$m = M_{ed} / (b \cdot d^2 \cdot f_{cd}) \quad (68)$$

$$w = 1 - \sqrt{1 - 2m} \quad (69)$$

$$z = d \cdot (1 - w/2) \quad (70)$$

$$A_{s, req} = M_{ed} / (z * f_{yd}) \quad (71)$$

missä:

m	suhteellinen momentti
w	mekaaninen raudoitussuhde
z	sisäinen momenttivarsi
M_{ed}	mitoitusmomentti
b	tarkasteltavan rakenteen osan leveys
d	tehokas korkeus
f_{cd}	betonin puristuslujuuden mitoitusarvo
f_{yd}	betoniteräksen lujuuden mitoitusarvo

5.7.2 KRT

Teräsbetonirakenteissa yksi tehtävä KRT-tarkastelu on halkeamaleveyden tarkistaminen. Halkeamat vaikuttavat oleellisesti rakenteen säilyvyyteen ja betoniteräksien korroosiokestävyyteen ja ne eivät saa ylittää rasitusluokasta riippuvaa raja-arvoa Pakkosiirtymät, pakkomuodonmuutokset, plastiset kutistumat, kuormitus ja erityisesti pakkomuo-

donmuutosten estäminen aiheuttavat betoniin halkeamia. Tapauskohtaisesti määritellään sallitut halkeamaleveydet. Halkeamia voidaan estää lisäämällä raudoitusta alueella, missä esiintyy vetoa. Ensisijaisesti halkeamaleveyttä rajoitetaan raudoitustankojen koolla ja jaolla taulukoiden 9 ja 10 periaatteilla tai kohdan SFS-EN 1992-1-1 7.3.4 mukaisella halkeamaleveyden laskennalla. Tarvittava minimiraudoitemäärä vedetyssä pinnassa lasketaan kaavalla 72, ja vähintään sitä määrää tulee käyttää mikäli halkeilua halutaan rajoittaa. [10, s.121.]

$$A_{s,min} \cdot S_s = k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct} \quad (72)$$

missä:

$A_{s,min}$	tarvittava teräksen pinta-ala
S_s	raudoituksen sallitun suurimman jännityksen itseisarvo välittömästi halkeaman muodostumisen jälkeen
$f_{ct,eff}$	betonin vetolujuuden keskiarvo ajankohtana, jolloin halkeaman voidaan aikaisintaan odottaa muodostuvan. Yleensä otaksutaan $f_{ct,eff} = f_{ctm} / 2$
k	kerroin, jonka avulla huomioidaan erisuuruisten toisensa tasapainossa pitävien jännitysten vaikutus
k_c	kerroin, jonka avulla otetaan huomioon jännitysten jakauma välittömästi ennen halkeilua ja sisäisen momenttivarren muutos

Taulukko 9. Halkeamaleveyden rajoittamisen edellyttämät tangon enimmäishalkaisijat SFS-EN 1992-1-1 mukaan. [10, s.120]

Teräsjännitys [MPa] Asianomaisella kuormituksella	Suurin tankokoko		
	$w_k = 0,4 \text{ mm}$	$w_k = 0,3 \text{ mm}$	$w_k = 0,2 \text{ mm}$
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5
400	8	6	4
450	6	5	-

Taulukko 10. Halkeamaleveyden rajoittamisen edellyttämä tankojaon enimmäisarvo SFS-EN 1992-1-1 mukaan. [10, s.120]

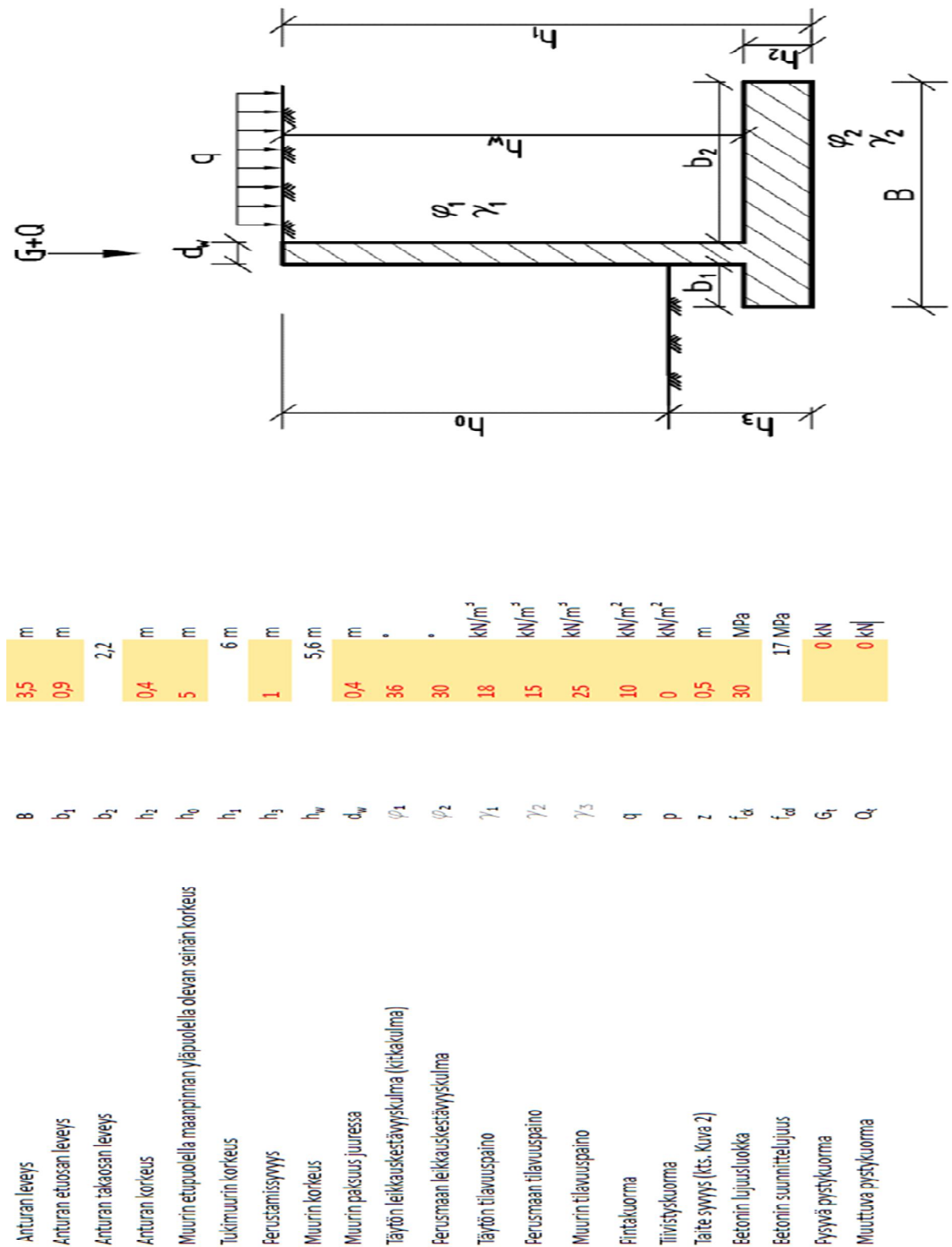
Teräsjännitys [MPa] Asianomaisella kuormituksella	Tankojaon enimmäisarvo [mm]		
	$w_k = 0,4 \text{ mm}$	$w_k = 0,3 \text{ mm}$	$w_k = 0,2 \text{ mm}$
160	300	300	200
200	300	250	150
240	250	200	100
280	200	150	50
320	150	100	-
360	100	50	-

Tästä opinnäytetyöstä on rajattu rakenteellisen mitoituksen KRT-tarkastelu pois.

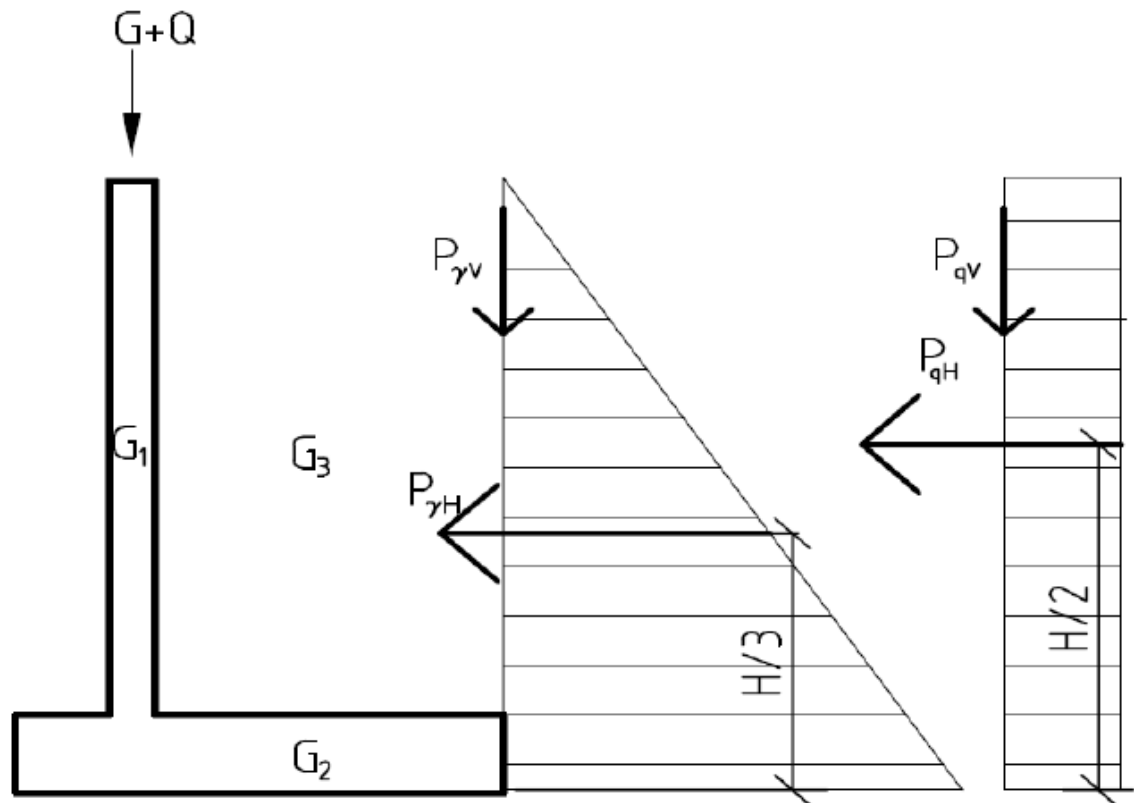
6 Mitoitusesimerkki laskentapohjan avulla

Opinnäytetyön käytännön osuutena oli laatia eurokoodeihin perustuva Excel-laskentapohja kulmatukimuurin mitoistusta varten. Suunnittelija voi valita, laskeeko hän aktiivisella maanpaineella vai lepopaineella. Laskentapohjassa tukimuurin mitat iteroidaan, jotta tarvittavat mitoistusehdot täyttyvät. Ohjelma laskee annetuilla parametreilla kanto-, liuku- ja kaatumiskestävyyden sekä tarvittavan raudoite pinta-alan tukimuurin juuressa. Laskentapohja toimii mitoistustavan 2* periaatteella. Laskentapohjan avulla voidaan mitoittaa L:n tai käänteisen T:n muotoinen tukimuuri. Täytön puolella ohjelma laskee kaltevan tai tasisen maanpinnan aiheuttaman maanpaineen.

Teoksessa BY 204, Betonirakenteiden mitoistustehtäviä ratkaisuihin on mitoistettu esimerkissä 12.2 paikalla valettava tukimuuri Rakentamismääräyskokoelman mukaan. Esimerkissä on lopuksi esitetty vertailu laskentapohjan tuloksista ja BY 204:n tuloksista vastaavilla parametreilla. Tuloksia vertaillessa on huomioitava, että kuormien osavarmuuseruvut pysyvälle ja muuttuvalle kuormalle Rakentamismääräyskokoelman mukaan poikkeavat Eurokoodien antamista arvoista. Samoin BY 204 esimerkissä betonin lujuusluokka on annettu K-lukuna ja laskentapohja käyttää Eurokoodien mukaisia C-lukuja. Eurokoodien mukaiset betonin lujuusluokat kertovat käytettävän betonin lieriö- ja kuutiopuristuslujuuden ominaisarvon ja Rakentamismääräyskokoelman K-luvut kertovat betonin kuutiopuristuslujuuden ominaisarvon. Esimerkiksi vanhan normin betoni K-30 vastaa uuden normin C25/30 betonia. [12, s.270.]



Kuva 13. Esimerkin lähtötiedot



Kuva 14. Tukimuuriin vaikuttavat voimat esimerkin tapauksessa

Aktiivisen maanpaineen kerroin

$$K_a = (1 - \sin(\varphi_1)) / (1 + \sin(\varphi_1))$$

RIL 157-2 s.166

$$K_a = 0,26$$

Aktiivisen maanpaineen horisontaalikomponentin kerroin

Maanpainekuormien vaakakomponenttien resultantit ja niiden etäisyys anturan alapinnasta

$P_{\gamma H} = K_a \cdot \gamma_1 \cdot h_1^2 \cdot 0,5$	84,12 kN/m	$e_{\gamma H} = h_1/3$	2,00 m
$P_{qH} = K_a \cdot p \cdot h_1$	15,58 kN/m	$e_{qH} = h_1/2$	3,00 m

Maanpaineen pystykomponentti ja etäisyys peruslaatan painopisteestä

$P_{\gamma V} = \gamma_1 \cdot h_w \cdot (B - b_1 - d_w)$	221,76 kN/m	$e_{\gamma V} = B/2 - b_2/2$	0,65 m
$P_{qV} = q \cdot (B - b_1 - d_w)$	22,00 kN/m	$e_{qV} = B/2 - b_2/2$	0,65 m

Pysyvät kuormat sekä komponenttien epäkeskisyydet pohjapinnan painopisteeseen nähden

$G_1 = G_{\text{psytyosa}} = \gamma_3 \cdot h_w \cdot d_w$	56,00 kN/m	$e_1 = B/2 - d_w/2 - b_1$	0,65 m
$G_2 = G_{\text{antura}} = \gamma_3 \cdot h_2 \cdot B$	35,00 kN/m	$e_2 = 0$	0,00 m
$G_3 = G_{\text{täyttö}} = \gamma_1 \cdot (B - d_w) \cdot h_w$	221,76 kN/m	$e_3 = B/2 - b_2/2$	0,65 m

Kuva 15. Rakenteen pysyvien ja muuttuvien kuormien laskenta

Tukimuurin mitoituksessa voidaan käyttää aktiivista maanpainetta, kun rakenteen sallitaan liikkua ja kiertyä hieman. Tässä tapauksessa ei ole mitään syytä, miksi emme sallisi pientä liikettä, joten voimme laskea ja mitoittaa tukimuurin aktiivipainetta vastaan. Jos tukimuurin päällä olisi rakennus tai tukimuuri olisi osa jotain isompaa rakennelmaa tai se olisi kallionvaraan perustettu, niin silloin tulisi mitoittaa muuri lepopaineelle.

Kuormayhdistelmän suunnitteluvarvo: Pysyvät kuormat (kaava 6.10a)

$H_k = P_a$	84,12 kN/m	Maanpaineen vaakakomponentin resultantti
$G = G_{\text{pystyosa}} + G_{\text{pohjalaatta}} + G_{\text{täyttö}} + G_t$	312,76 kN/m	Tukimuurin ja täytön omapaino
$V_{ka} = G$	312,76 kN/m	Pystykuormien resultantti
$M_k = G_1 * e_1 + G_2 * e_2 + G_3 * (-e_3) + P_a * e + G_t * e_1$		Momentti pohjapinnan painopisteen suhteen
M_k	60,49 kNm/m	
$e_B = M_k / V_{ka}$	0,19 m	Epäkeskeisyys ominaiskuormilla
$B_t = B - 2e_B$	3,11 m	Tehollinen leveys
$V_d = V_{ka} * 1,35$	422,23 kN/m	Pystykuorman suunnitteluvarvo
$q_d = V_d / B_t$	135,62 kN/m ²	Pohjapaineen suunnitteluvarvo

OK!

Kuormayhdistelmän suunnitteluvarvo: Pysyvät kuormat+hyötykuormat (kaava 6.10b)

$H_k = P_a + P_{qH}$	99,69 kN/m	Maanpaineen ja pintakuorman vaakakomponentin resultantti
$V_{kb} = G + P_{qV}$	334,76 kN/m	Pystykuormien resultantti
$M_k = G_1 * e_1 + G_2 * e_2 + G_3 * (-e_3) + P_a * e + P_{qH} * e_{qH} - P_{qV} * e_{qV} + (G_t + Q_t) * e_1$		
M_k	92,92 kNm/m	Momentti pohjapinnan painopisteen suhteen
$e_B = M_k / V_{kb}$	0,28 m	Epäkeskeisyys
$B_t = B - 2e_B$	2,94 m	Tehollinen leveys
$V_d = 1,15 * G + 1,15 * P_{qV} + 1,5 * P_{qV}$	392,67 kN/m	Kuorman suunnitteluvarvo
$q_d = V_d / B_t$	133,34 kN/m ²	Pohjapaineen suunnitteluvarvo

OK!


Mitoittava pohjapaine	135,62 kN/m ²
Mitoittava pystykuorma	422,23 kN/m
Mitoittava vaakakuorma	84,12 kN/m
Mitoittaa tehollinen leveys	3,11 m
Mitoittava pystykuormien resultantti	312,76 kN/m

Kuva 16. Kuormien yhdistely

Kantavuustarkastelussa määräävä suure on pohjapaine. Eurokoodien mukaan tulee tarkistaa kumpi kaavoista 6.10a vai 6.10b antaa suuremman pohjapaineen arvon ja laskenta jatkuu tämän kuormitusyhdistelmän arvoja käyttäen. Epäkeskeisyys lasketaan ominaiskuormilla. Osavarmuuslukuja käytetään laskennan lopussa, jotta saadaan kuormista mitoitusarvot. Mitoitustavassa 2* kantokestävyyttä laskettaessa pysyvät kuormat ovat aina epäedullisia.

Jos käytettäisiin mitoitusastapaa 2, niin anturan epäkeskeisyys laskettaisiin käyttäen kuormien mitoitusarvoja. Kuormat siis kerrotaisiin joko edullisen tai epäedullisen kuorman osavarmuusluvulla ennen momentin ja pystykuorman resultantin laskentaa.

Maaperän kantavuus MRT

$R/B_t = q^* N_q^* b_q^* s_q^* i_q + 0,5 \cdot \gamma^* N_\gamma^* B_t^* b_\gamma^* s_\gamma^* i_\gamma$		Kantavuuskaava (ei koheesio termiä)	RIL 207 s.105
$q_{md} = (q^* N_q^* b_q^* s_q^* i_q + 0,5 \cdot \gamma^* N_\gamma^* B_t^* b_\gamma^* s_\gamma^* i_\gamma) / 1,55$	232,46 kN/m ²	Maaperän kantokestävyyden mitoitusarvo	
$q^* = \gamma_1 h_3$	18,00 kN/m ²	Maamassan paine perustamissyvytydessä	
$N_q = e^{\pi \tan(\varphi_2)} \cdot \tan(45 + (\varphi_2/2))^2$	18,40	Kantavuuskerroin	RIL 207 s.105
$N_\gamma = 2 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan(\varphi_2)$	20,09	Kantavuuskerroin	RIL 207 s.105
s_q	1,00	Muotokerroin	RIL 157-2 s. 76
s_γ	1,00	Muotokerroin	RIL 157-2 s.76
m_B	2,00	Vaakuormen suunta	
$i_q = (1 - H_v/V_k)^{m_B}$	0,53	Vinouskerroin	RIL 207 s.106
$i_\gamma = (1 - H_v/V_k)^{m_B+1}$	0,39	Vinouskerroin	RIL 207 s.106
$R_d = q_{md}/B_t$	723,70 kN/m	Kuormakestävyyden mitoitusarvo	
Mitoitusehto: V_d/R_d			
Käyttöaste:	58,34 %		

Kuva 17. Maaperän kantavuuden laskenta

Laskentapohjassa on oletettu, että tukimuuri perustetaan aina kitkamaalle, koska se on erittäin paljon yleisempää kuin koheesiomaalle perustaminen. Anturan alapinnan oletetaan olevan vaakasuora, joten kertoimet, jotka ottavat kaltevuuden huomioon saavat arvon 1. Sekamaalajeissa, kuten moreeni, maaperän kantavuus perustuu osittain kitkaan ja osittain koheesioon. RIL 157-2 mukaan tällöin voidaan olettaa, että laskennassa maa on joko kokonaan kitkamaata tai kokonaan koheesiomaata. [6, s.153]

Kohdassa 4.1 kestävyttä käsittelevässä osassa kerrottiin, että kestävyiden mitoitusarvo voidaan laskea kahdella tavalla. Tässä tapauksessa varmuus voitaisiin sisällyttää maaperän leikkauskestävyyskulmaan jakamalla se osavarmuusluvulla laskennan

alussa. Tämä vaikuttaisi kantavuuskertoimiin N_q ja N_g . Laskennan lopussa voitaisiin vielä jakaa toisella osavarmuusluvulla, mutta tämä ei ole standardin SFS-EN 1997 mukaan pakollista.

GEO Liukuvarmuustarkastelu: Pysyvät kuormat (kaava 6.10a), Varmuuskertoimet taulukosta A.13

RIL 207 s.52

$H_d = 1,35 \cdot P_a$	113,56 kN/m	Suurin vaakakomponentti
$V_d = G$	312,76 kN/m	Pienin pystykomponentti
$R_{dl} = (\tan(\varphi_2) \cdot V_d) / 1,1$	164,16 kN/m	Liukuvarmuus (paikalla valettu)
Mitoitusehto: $H_d < R_{dl}$		
Käyttöaste:	69,18 %	

OK!

GEO Liukuvarmuustarkastelu: Pysyvät kuormat + hyötykuormat (kaava 6.10b), Varmuuskertoimet taulukosta A.13

$H_d = 1,15 \cdot P_a + 1,5 \cdot P_{qH}$	120,10 kN/m	Suurin vaakakomponentti
$V_d = V_{kb}$	334,76 kN/m	Pienin pystykomponentti
$R_{dl} = (\tan(\varphi_2) \cdot V_d) / 1,1$	175,70 kN/m	Liukuvarmuus (paikalla valettu)
Mitoitusehto: $H_d < R_{dl}$		
Käyttöaste:	68,35293 %	

OK!

EQU- Tasapainotarkastelu (kaatumispiste muurin etureunassa), Varmuuskertoimet taulukosta A.1

RIL 207 s.47

$M_{dst,k} = 1,1 \cdot P_a \cdot h/3 + 1,5 \cdot P_{qH} \cdot h_w/2$	255,15 kNm/m
$M_{stb,k} = 0,9 \cdot G_{pystysosa} \cdot d_w/2 + 0,9 \cdot G_{pohjalaatta} \cdot B/2 + 0,9 \cdot G_{täyttö} \cdot (B-b_2/2) + G_t \cdot d_w/2$	
$M_{stb,k}$	589,57 kNm/m
Mitoitusehto: $M_{dst} < M_{stb}$	
Käyttöaste:	43,28 %

OK!

STR- Momentin ja leikkausvoiman maksimi, varmuuskertoimet taulukosta A.3

RIL 207 s.49

$M_{max} = 1,15 \cdot P_a \cdot h_w/3 + 1,5 \cdot P_{qH} \cdot h_w/2$	245,99 kNm/m
$Q_{max} = 1,15 \cdot P_a + 1,5 \cdot P_{qH}$	120,10 kN/m

Tarvittava teräksen pinta-ala muurin juuressa

BY 204 s. 272 sov.

$\mu = M_{max} / (d^2 \cdot f_{cd})$	0,125174
$\omega = 1 - \sqrt{1 - 2\mu}$	0,134175
$A_{s,vaadittu} = \omega \cdot d \cdot (f_{cd} / f_{yd})$	1783 mm ² /m

OK!

Kuva 18. Liukuvarmuuden, staattisen tasapainon ja mitoittavien voimasuureiden laskenta

Maapohjan kantavuutta ja liukuvarmuutta tarkastellaan samassa rajatilassa joten kuormille käytetään samoja osavarmuuslukuja. Samoin, kun lasketaan rakenteellista mitoittusta varten momentin ja leikkausvoiman ääriarvoja, ovat varmuuskertoimet myös samat. Rajatilassa EQU kaatavien kuormien osavarmuusluvut muuttuvat. Liukuvarmuuden osavarmuusluku on standardin SFS-EN 1997 mukaan 1,1 ja kantokestävyyden osavarmuusluku 1,55 talonrakennuskohteissa.

TULOKSET

Kantokestävyys

Pohjapaineen mitoitusarvo	135,62 kN/m ²
Kantokestävyyden mitoitusarvo	232,46 kN/m ²
Käyttöaste:	58,34 %

Liukumisvarmuus

Suurin vaakakomponentti	120,10 kN/m
Pienin pystykomponentti	175,70 kN/m
Käyttöaste	68,35 %

Kaatumisvarmuus

Kaatava momentti	255,15 kNm/m
Stabiloiva momentti	589,57 kNm/m
Käyttöaste:	43,28 %

Rakenteellisen mitoituksen voimasuureet

M_{\max}	245,99 kNm/m
Q_{\max}	120,10 kN/m
$A_{s,\text{vaadittu}}$	1782,83 mm ² /m

Kuva 19. Laskennan tulokset mitoitus pohjalla

BY 204 Esimerkki 12.2 TULOKSET

Kantokestävyys

Pohjapaineen mitoitusarvo	154,00 kN/m ²	$\sigma_{\text{sall}} = 250 \text{ kN/m}^2$
Kantokestävyysden mitoitusarvo	250,00 kN/m ²	
Käyttöaste:	61,60 %	

Liukumisvarmuus

Suurin vaakakomponentti	107,00 kN/m	Liukuvarmuuden toteaminen Perustettu siltin varaan $\phi = 30$ $G \cdot \tan(\phi) / H_{\text{max}} = 1.66 > 1,5$
Pienin pystykomponentti	310,00 kN/m	
Käyttöaste	90,00 %	

Kaatumisvarmuus

Kaatava momentti	238,00 kNm/m
Stabiloiva momentti	737,00 kNm/m
Käyttöaste:	32,29 %

Rakenteellisen mitoituksen voimasuureet

M_{max}	287,00 kNm/m	HUOM! Teräksen laatu A400HW
Q_{max}	kN/m	
$A_{s, \text{vaadittu}}$	2425,00 mm ² /m	

Kuva 20. BY-204 tulokset taulukoituna [12]

7 Yhteenveto

Tämän opinnäytetyön kirjallisen osuuden tarkoituksena oli selvittää eurokoodien mukaisia suunnitteluperiaatteita. Eurokoodit ovat rakenteeltaan hyvin paljon monimutkaisempi suunnittelustandardi verrattuna aikaisemmin voimassa olleeseen Rakentamismääräyskokoelmaan ja jokaisen suunnittelijan olisi myös hyvä tutustua sen periaatteisiin ja ominaisuuksiin.

Kulmatukimuurin mitoitus koostuu geoteknisestä ja rakenteellisesta osasta. Geoteknisessä osuudessa tarkastetaan rakenteen varmuus maapohjan murtumista, liiallisia muodonmuutoksia, liukumista ja kaatumista vastaan. Rakenteellisessa mitoituksessa tarkastetaan rakenteen kestävyys ja säilyvyys, jotta rakenne kestää sille tulevat kuormat riittäväällä varmuudella. Rakenteellisessa mitoituksessa käyttörajatilassa tarkistetaan teräsbetonirakenteen säilyvyys halkeamaleveyksien avulla. Hankalaksi mitoituksen tekee rajatilojen ja mitoitusapojen yhdistäminen. Mitoitustapa 2 ja 2* antavat erisuuruisia tuloksia, jos kuorma on epäkeskeinen. Tukimuurin tapauksessa kuorman resultantti on aina epäkeskeinen johtuen maanpainekuorman vaakakomponentista. Rajatilojen yhdistäminen ei onnistu suoraan, koska osavarmuusluvut muuttuvat usein rajatilojen mukana.

Coulombin maanpaineteoria soveltuu tukimuurin mitoittamiseen kohtalaisen hyvin. Mahdolliset virheet ovat aktiivipaineella noin muutaman prosentin luokkaa, mutta passiivipaineella ne saattavat nousta nopeasti useisiin kymmeniin prosenteihin. Talonrakennusprojekteissa tukimuurit usein mitoitetaan joko aktiivi- tai lepopaineen avulla, joten klassisen maanpaineteorian sisältämät virheet pysyvät suhteellisen pieninä. Passiivipaine voisi toteutua esimerkiksi liukuvarmuustarkastelussa, kun tukimuurin varpaan puolella oleva maamassa voisi toimia liukuvarmuutta tuovana tekijänä, mutta usein se jätetään laskennassa huomioimatta. Passiivipaineella on suurempi merkitys siltasuunnittelussa.

8 Pohdinta

Tarkasteltavien kuormitustapausten ja tilanteiden määrä kasvaa tukimuureja mitoitettaessa nopeasti, jos yksinkertaistuksia ei tehdä riittävästi. Pohjaveden korkeuden muutokset, routapaine, tukimuurin geometria ja siitä johtuvat maanpaineen muutokset, maanpaineteoriat ja mitoitustavat luovat kaikki omia kuormitustilanteita, jotka pitäisi tarkistaa.

Tukimuurin mitoituksessa hankaluudeksi muodostuu myös lähtötietojen todenmukaisuus. Pienetkin muutokset maaparametreissa kuten leikkauskestävyyskulmassa aiheuttavat suuria muutoksia laskennan lopputulokseen. Maaperän ominaisuuksilla laskettaessa on myös se ongelma, että maan lujuuden arvot eivät ole vakioita. Kitkamaissa rakeiden muoto, kulmikkuus, koko yms. ominaisuudet vaikuttavat leikkauskestävyyskulmaan ja sitä kautta mitoitukseen oleellisesti. Liian optimistiset arvot antavat helposti liian pienen anturan leveyden, kun taas liian pessimistiset arvot aiheuttavat turhaa ylimitoitusta.

Eurokoodien ja erityisesti Eurokoodi 7:n fundamentaalinen ongelma on ohjeistus. Normit sisältävät suuren määrän ohjeita asioista, joita pitää ottaa huomioon, mutta siihen, miten nämä asiat otetaan huomioon, ei usein oteta kantaa. Tämä jättää suunnittelijalle paljon tulkinnan varaa.

Lähteet

- 1 Ympäristöministeriön kotisivut, http://www.ym.fi/maankaytto_ja_rakentamisen/lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Tietoa_eurokoodaista, luettu 15.10.2014
- 2 Helenelund, K.V., Pohjarakennus ja maarakennusmekaniikka 1, 1956
- 3 Helenelund, K.V., Pohjarakennus ja maarakennusmekaniikka 2, 1957
- 4 Liikenneviraston kotisivut, http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lo_2011-12_ncci7_web.pdf, luettu 21.10.2014
- 5 RIL 166, Pohjarakenteet, 1988
- 6 RIL 157-2, Geomekaniikka 2, 1990
- 7 RIL 207, Geotekninen suunnittelu, 2009
- 8 SFS-EN 1990-1-1, Eurokoodi 0: Rakenteiden suunnitteluperusteet, 2006
- 9 SFS-EN 1991-1, Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat, 2002
- 10 SFS-EN 1992-1-1, Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu, 2005
- 11 SFS-EN 1997-1, Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu, 2005
- 12 BY 204, Betonirakenteiden mitoitus tehtäviä ratkaisuihin, 1982
- 13 Eurokoodi komission kotisivut, http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/2013_06_WS_GEO/report/2013_06_WS_GEO.pdf, luettu 12.12.2014
- 14 Bond A. & Harris A., Decoding Eurocode 7, 2008
- 15 North East Gabions kotisivut, <http://www.northeastgabions.com/references.html>, 15.12.2014
- 16 SoilStructure kotisivut, <http://www.soilstructure.com/structural-software/cantilever-retaining-wall>, luettu 10.1.2015
- 17 Pixshark kotisivut, <http://pixshark.com/counterfort-retaining-wall.htm>, luettu 15.1.2015

- 18 Liikenneviraston kotisivut, http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2011-26_ratojen_tukiseinien_web.pdf, luettu 10.1.2015
- 19 RIL 121-2004, Pohjarakennusohjeet, 2004